

CONTROLES NON-DESTRUCTIFS

Radiologie
Ultrasons
Magnétoscopie
Ressuage
Courants de Foucault

En couverture : Mise en place d'un accélérateur linéaire pour
le contrôle d'un fond moulé

Gilles PEIX
Laboratoire d'Etude des
matériaux

1980

S O M M A I R E

- Introduction	p. 2
- Détection des défauts internes	p. 10
A/ Radiologie par rayons X ou γ	p. 10
B/ Contrôle par ultrasons	p. 50
C/ Comparaison de la radiologie et des U.S.	p. 69
- Spécifications de contrôle	p. 70
- Détection des défauts superficiels	p. 88
I/ Magnétoscopie	p. 88
II/ Ressuage	p. 93
III/ Courants de Foucault	p. 95
- Annexe : les risques d'irradiation dans le domaine de la radiologie industrielle	

INTRODUCTION

I-Possibilités et limites des C.N.D. (contrôles non-destructifs).

1-Développement des C.N.D.

Entre 1816 et 1848, sur les bateaux à vapeur du Mississippi, 1443 personnes perdirent la vie par suite de l'éclatement de la chaudière. En 1865, une seule explosion tua 1547 personnes. La vapeur était, à cette époque, une énergie nouvelle.

De nos jours, les chaudières des centrales (thermiques ou nucléaires) n'éclatent plus : la probabilité d'explosion d'une chaudière sous pression est inférieure à 10^{-6} .

Cette différence s'explique par les progrès réalisés dans le domaine de l'élaboration des matériaux et dans le domaine de la conception et de la réalisation des ensembles mécaniques. Elle s'explique également par le développement des C.N.D.

Les contrôles radiologiques ont eu une expansion rapide à partir de 1930. Il a fallu attendre 1960 pour observer un développement semblable dans le domaine des contrôles par ultrasons.

La mise en oeuvre des C.N.D. dans diverses branches de l'industrie a coïncidé avec d'importants progrès des C.N.D. eux-mêmes. Ces progrès portent sur trois aspects :

-la technique : amélioration de la finesse de détection des défauts.

-l'interprétation des contrôles : il n'est pas possible de fabriquer des ensembles exempts de défauts ! Il faut alors s'entendre pour accepter les défauts les moins dangereux et réparer les autres (ou rebuter la pièce entière).

On établit, de nos jours, des "codes d'acceptations des défauts" de plus en plus précis.

-1'organisation des services de C.N.D. des grandes entreprises :
ces services, en relation avec le client, prennent la décision d'acceptation, de réparation ou de rebut. Ces décisions peuvent être prises au niveau d'un lot de pièces dans le cas d'une fabrication en série. Dans le cas d'une fabrication en petit nombre, de telles décisions sont parfois prises au niveau d'une pièce ou même d'un défaut particulier.

2-Choix d'une méthode de contrôle.

Afin de mettre au point une méthode de C.N.D. pour une pièce, il convient de définir :

a) l'utilisation que l'on veut faire de la pièce, en particulier, le type de sollicitations en service (contraintes, vibrations, température, cavitation...).

b) le type et la dimension des défauts que l'on tolérera. Le type de défaut cherché permettra de choisir une (ou plusieurs) technique de contrôle (radiologie, ultrasons, etc.). La dimension des défauts tolérés déterminera la finesse du contrôle, au sein de chaque technique.

Le point a) conduit à la définition de la qualité de la pièce : qualité Q_1 , qualité Q_2 . La qualité Q_1 correspond à des sollicitations sévères ainsi qu'à des dommages importants en cas de rupture accidentelle. Elle correspond à des pièces très fiables pour lesquelles le coût du contrôle est du même ordre de grandeur que le coût de fabrication.

Le point b) conduit à la définition de la classe du contrôle : classe 1, classe 2 etc. La classe 1, la plus sévère, correspond (pour une technique donnée, ultrasons ou radiologie) à l'exploration la plus complète de la pièce, à la finesse de détection la meilleure et à la sévérité la plus stricte pour l'acceptation des défauts.

Par exemple, sur une pièce de qualité Q_2 , certaines parties sont contrôlées en classe 1, d'autres en classe 2, ou 3. Le contrôle peut être à 100% ou bien partiel (statistique).

La définition précise du point b) constitue l'étape capitale : en étant trop tolérant, on ôte au contrôle toute valeur, mais en étant trop sévère, on rend le contrôle absurde. En effet :

- .le prix du contrôle augmente très vite avec la finesse de la détection.
- .le prix des réparations augmente si l'on abaisse le seuil des défauts acceptables.
- .à l'accroissement du prix des réparations vient s'ajouter l'augmentation des délais et l'immobilisation des matériels de production : n'oublions pas qu'après réparation il faut contrôler à nouveau.
- .une réparation (à l'arc) est une opération délicate. Un mauvais pré ou post-chauffage engendrera des défauts fins (fissures) qui risquent d'être plus difficiles à détecter que les défauts d'origine, tout en étant plus dangereux pour la pièce.

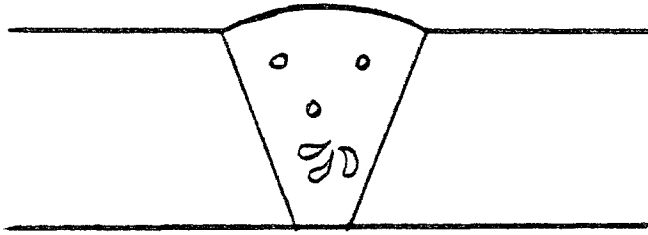
3-Limites des C.N.D.

Si l'on tente de répertorier les principales causes de rupture, on constate que la durée et le coût du C.N.D. peuvent être fortement abaissés par une meilleure conception de la pièce.

.Ruptures fragiles : elles sont, en fait, peu fréquentes. Dans le cas des récipients, un essai sous pression permet d'éliminer les pièces défectueuses. Le choix d'un métal plus ductile diminue fortement le risque de rupture et dispense d'un contrôle trop poussé.

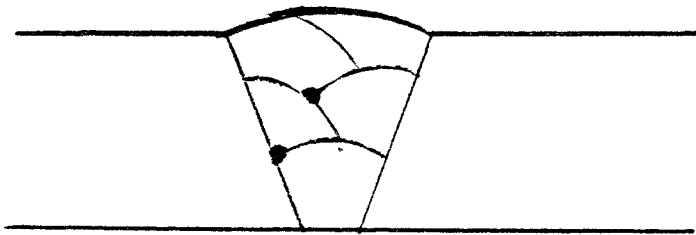
.Ruptures par fatigue : elles ne correspondent pas toujours à des défauts macroscopiques. La multiplication et le raffinement des contrôles

3-Exemples de défauts dans les joints soudés.

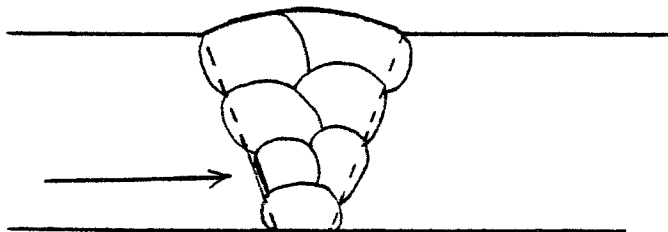


Inclusions gazeuses
ou soufflures

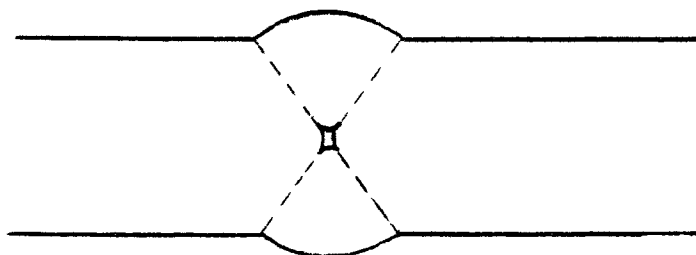
{ rondes ou
vermiculaires



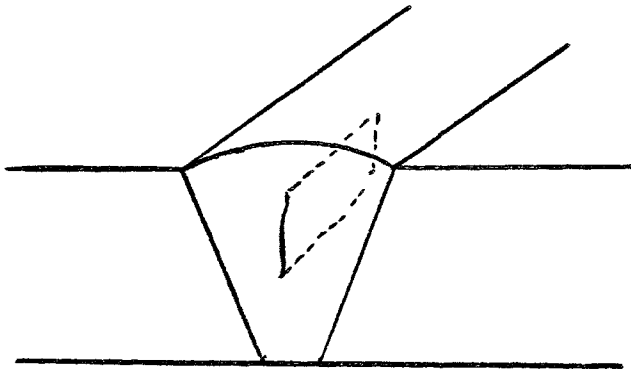
Inclusions solides
Inclusions de laitier.



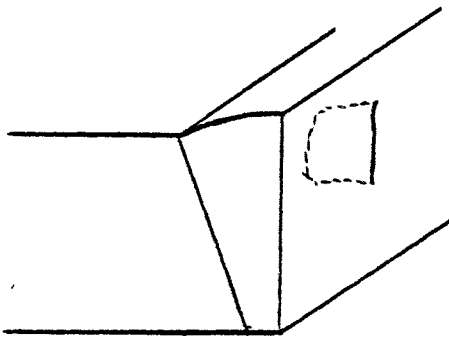
Manque de fusion
Collage



Manque de pénétration.

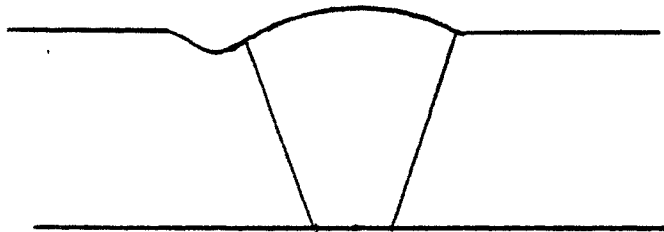


Fissure longitudinale.

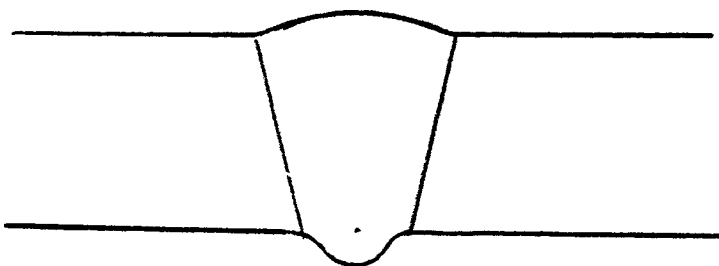


Fissure transversale.

(vue en coupe)

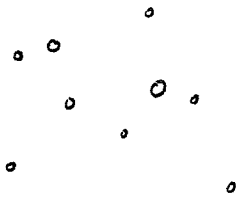


Sillon, caniveau
ou morsure.



Excès de pénétration.

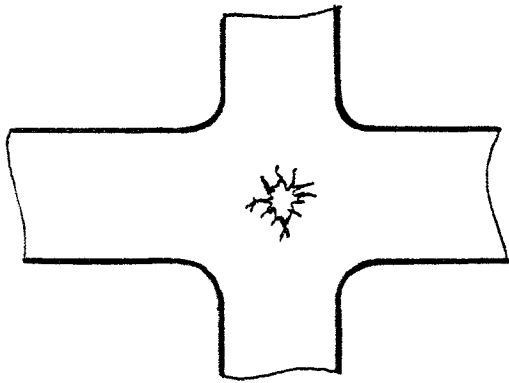
4-Exemples de défauts dans les pièces moulées.



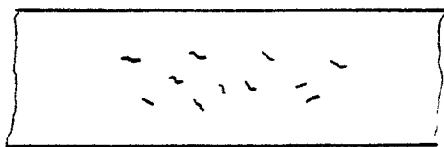
Inclusions gazeuses, porosités.



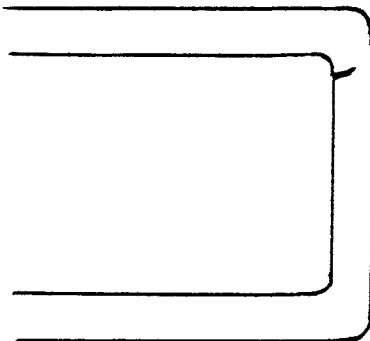
Inclusions solides (sable ou scories).



Macroretassure.



Microretassures



Crique de retrait,
limitation du retrait par le noyau.

DETECTION DES DEFAUTS INTERNES.

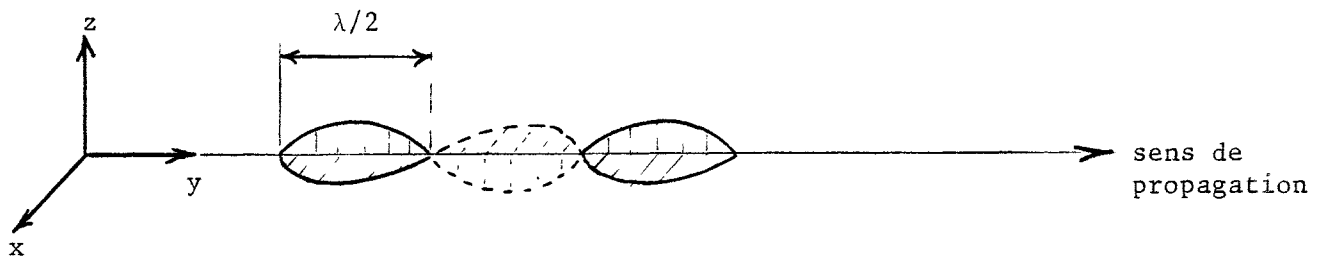
A) RADIOLOGIE PAR RAYONS X OU γ .

I-Propagation des rayonnements électromagnétiques.

Dans le vide, les rayonnements électromagnétiques se propagent en ligne droite, sans atténuation et à la vitesse de la lumière c .

1-Aspect ondulatoire.

Un champ électrique \vec{E} et un champ magnétique \vec{H} , perpendiculaires entre eux, permettent de définir une longueur d'onde λ et un sens de propagation de l'onde électromagnétique.



La fréquence ν se définit à partir de λ à l'aide de la formule :

$$c = \lambda \nu$$

dans laquelle c s'exprime en $\text{m} \times \text{s}^{-1}$, λ en m et ν en Hz.

Les rayons X ou γ se caractérisent par des longueurs d'ondes inférieures aux distances interatomiques : λ est compris entre 10^{-11} et 10^{-14} m, alors que les distances interatomiques sont de l'ordre de 10^{-9} à 10^{-10} m.

2-Aspect corpusculaire.

Les interactions entre les rayons X ou γ et la matière ne peuvent être pleinement comprises qu'à condition de considérer un faisceau de rayonnement comme étant constitué de particules de masse nulle. Dans le cas d'un rayonnement de fréquence ν , chaque particule, nommée photon, transporte une quantité élémentaire d'énergie E. Toutes les particules sont semblables et l'on a :

$$E = h\nu$$

où h représente la constante de Planck.

L'énergie du rayonnement est l'énergie E de chacune des particules qui le composent.

On peut encore écrire :

$$E = \frac{h c}{\lambda}$$

et l'on constate que l'énergie (on dit encore la "dureté") du rayonnement augmente lorsque sa longueur d'onde diminue. Nous verrons que, dans la pratique, les rayonnements pénètrent d'autant plus facilement la matière que λ est petit devant les distances interatomiques : on dit que l'on a des photons durs ou pénétrants.

En unités pratiques, la relation entre λ et E s'écrit :

$$\lambda = \frac{1,24 \times 10^{-6}}{E}$$

$$\begin{cases} \lambda \text{ en m} \\ E \text{ en eV} \end{cases}$$

L'énergie du rayonnement s'exprime rarement en eV : on emploie le keV ou le MeV. On utilise couramment des photons d'énergie comprise entre 50 keV et 8 MeV.

En traversant la matière, les photons sont atténués par suite d'interactions élémentaires de trois sortes :

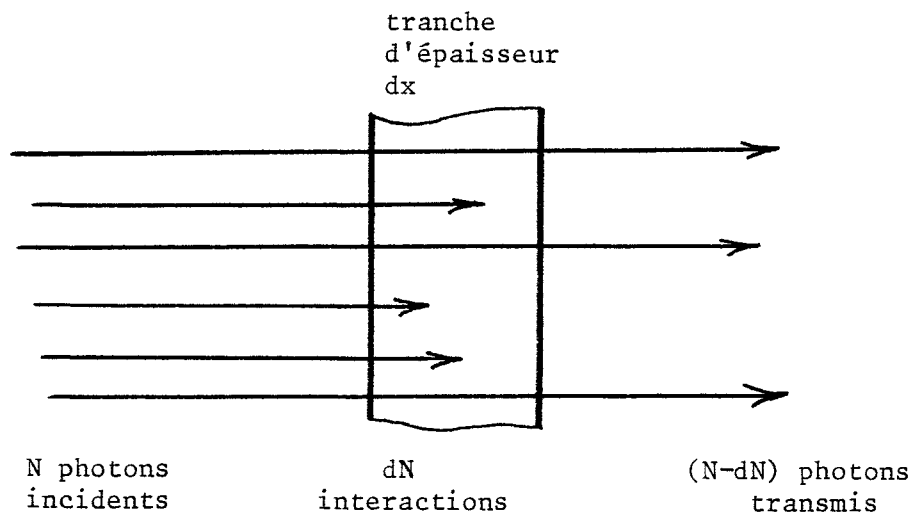
- l'effet photoélectrique,
- l'effet Compton,
- la matérialisation (ou création de paires).

3-Atténuation des rayons X ou γ par la matière.

Un rayonnement de longueur d'onde λ donnée, c'est-à-dire constituée de photons d'énergie $E = \frac{h c}{\lambda}$, arrivant dans une tranche de matière d'épaisseur dx est atténué. Soit N le nombre de photons arrivant sur la tranche dx , le nombre dN de photons subissant une interaction s'écrit :

$$dN = - \mu N dx$$

μ , appelé coefficient linéique d'atténuation, est exprimé en cm^{-1} . dN est négatif puisqu'il s'agit d'une disparition.



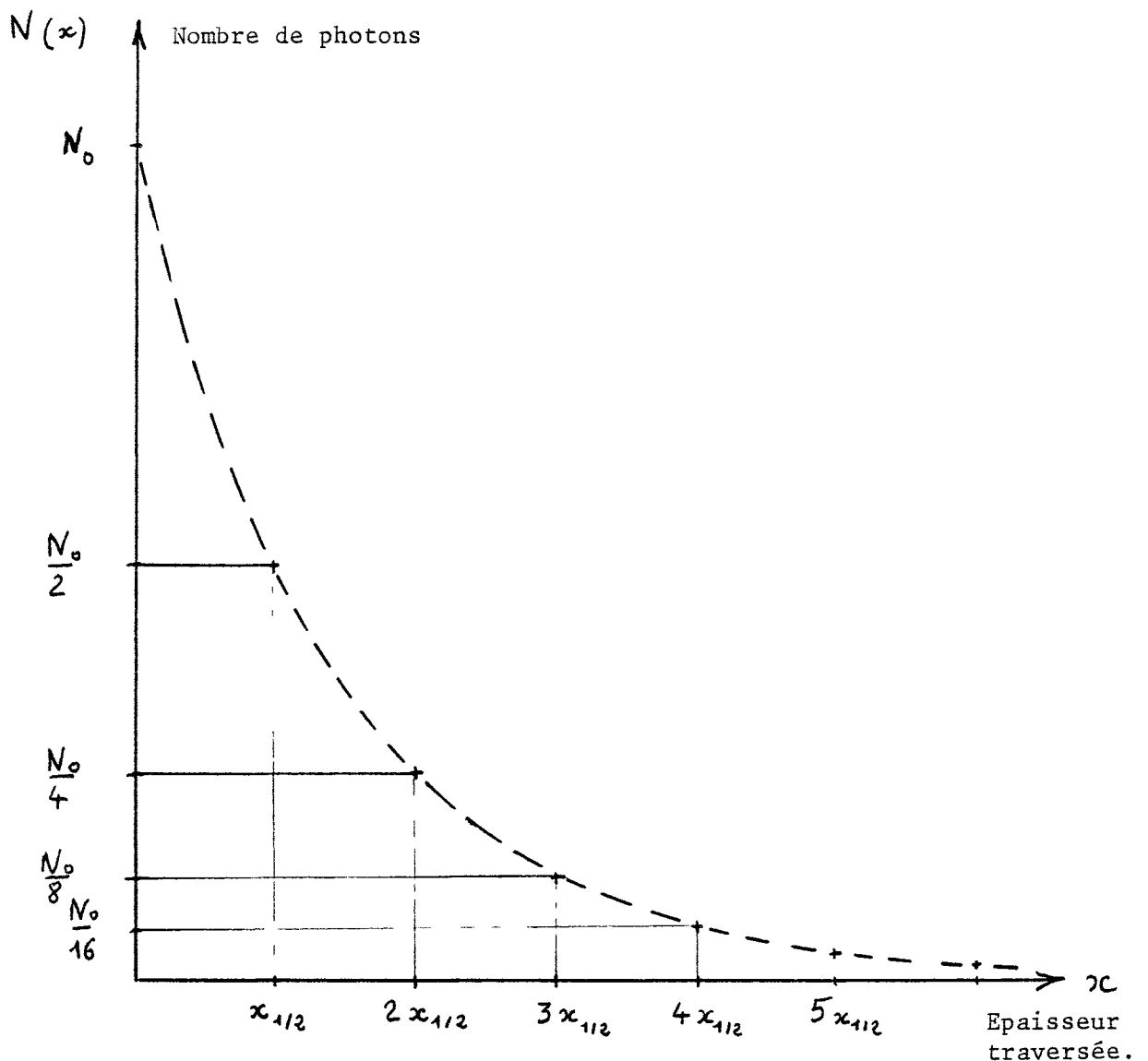
L'équation différentielle permet d'exprimer le nombre $N(x)$ de photons n'ayant subi aucune interaction après avoir traversé une épaisseur x de matière

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x}$$

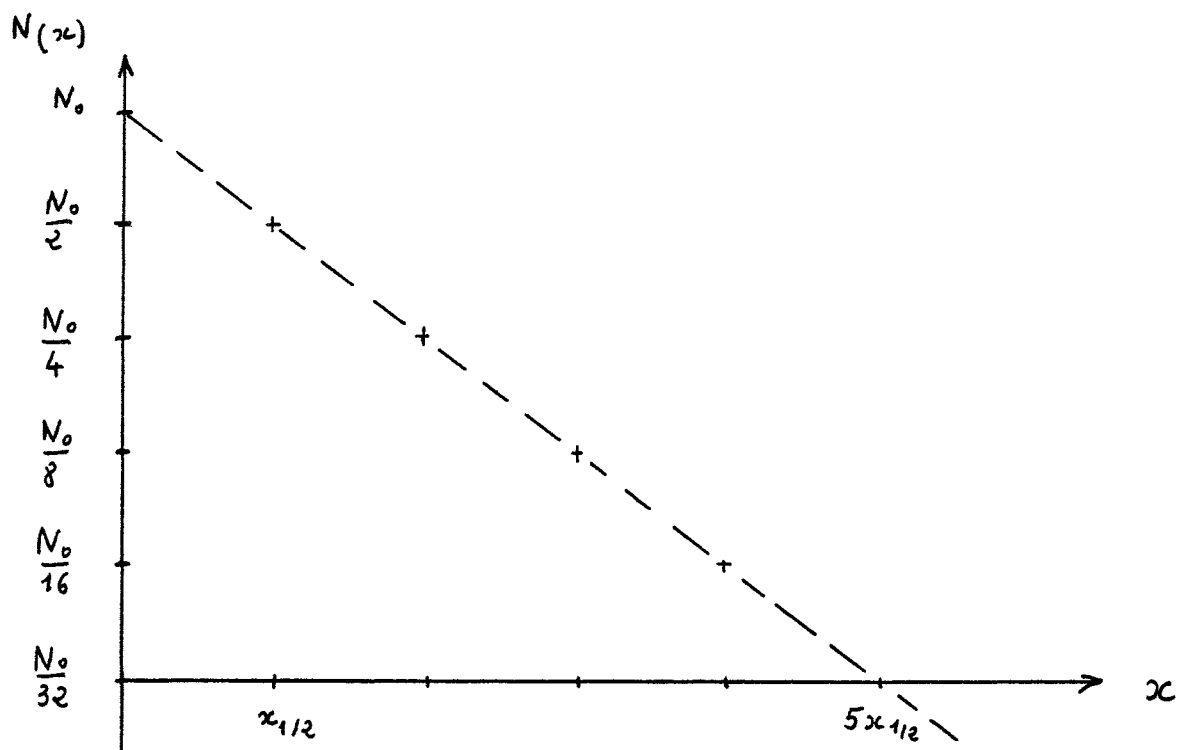
Dans cette équation, N_0 est le nombre de photons arrivant sur la matière (abscisse $x = 0$). On en tire la notion pratique d'épaisseur de demi-atténuation ou de demi-transmission, notée $x_{1/2}$. Pour $x = x_{1/2}$ on a $N(x) = N_0/2$ et :

$$\frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}}$$

$$x_{1/2} = \frac{0,693}{\mu}$$



En coordonnées semi-logarithmiques, on obtient une droite :



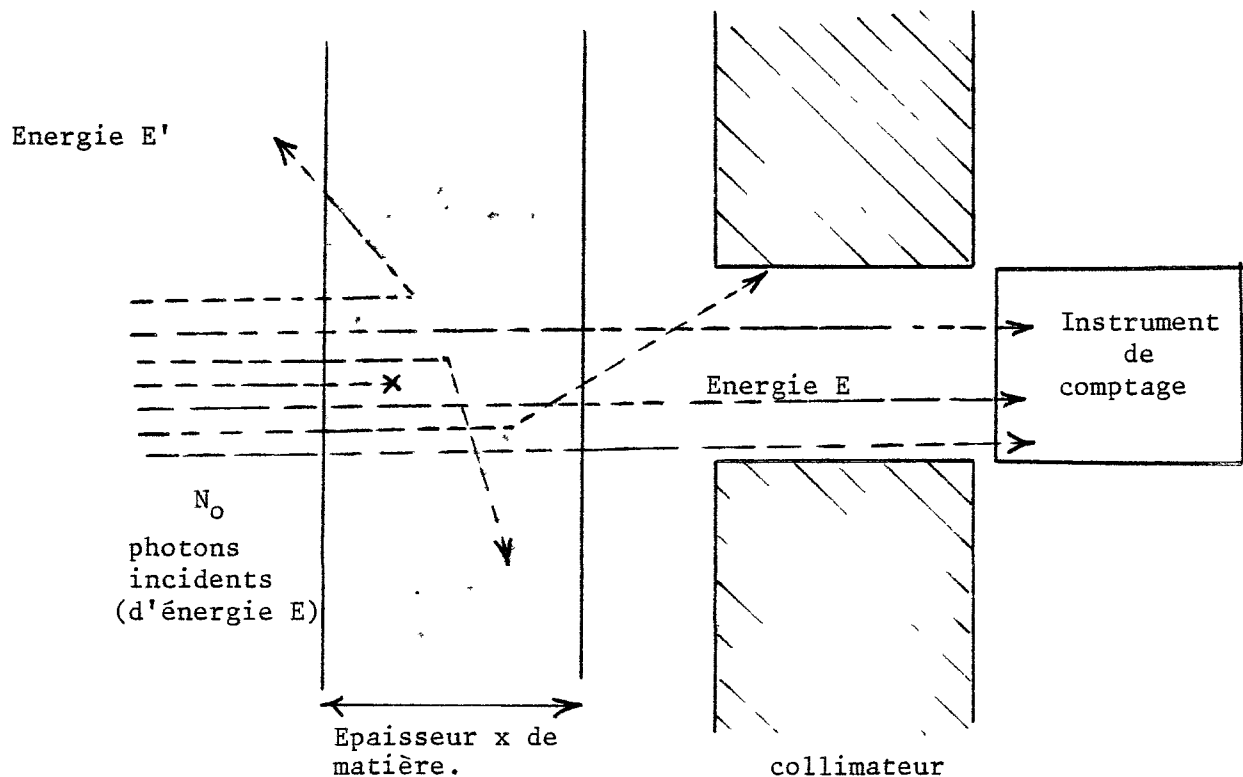
Les épaisseurs $x_{1/2}$ rencontrées ont toutes la même efficacité relative : chacune d'entre elles transmet la moitié des photons sans interaction.

	Epaisseur de demi-transmission ou de demi-atténuation en mm		
Matériau → Radionucléide ↓	Béton	Acier	Plomb
^{60}Co	100	20	13
^{137}Cs	80	15	6
^{192}Ir	60	12	4
^{170}Tm	-	1,5	0,13
Rayonnement			
50 kV	7	0,7	0,2
100 kV	18	1,8	0,4
200 kV	28	7	0,7
300 kV	31	16	2,1

Les photons qui entrent en interaction avec la matière sont :

-soit absorbés,

* / -soit diffusés, c'est-à-dire qu'ils ressortent de l'épaisseur avec une direction différente et une énergie E' inférieure à l'énergie E des photons incidents.



La valeur du coefficient linéique d'atténuation μ et, par suite, la valeur de $x_{1/2}$ dépendent :

-de la longueur d'onde du rayonnement, donc de l'énergie $E = h\nu$ de chaque photon,

-du matériau traversé (nature chimique et état physique).

Le rayonnement est atténué par la matière d'autant plus rapidement que :

-l'énergie des photons est faible (ce qui correspond à de grandes longueurs d'onde).

-le matériau est dense.

4-Notion de source ponctuelle de rayonnement.

Les sources X ou γ utilisées en C.N.D. sont, en fait, quasi-ponctuelles et les photons, issus de la source, véhiculent l'énergie dans l'espace.

Pour une source donnée, émettant un rayonnement d'énergie donnée, nous allons caractériser l'irradiation en un point P situé à une distance L de la source S entre les instants t_0 et t_1 .

Une irradiation se chiffre en rad, qui est l'unité de dose absorbée.

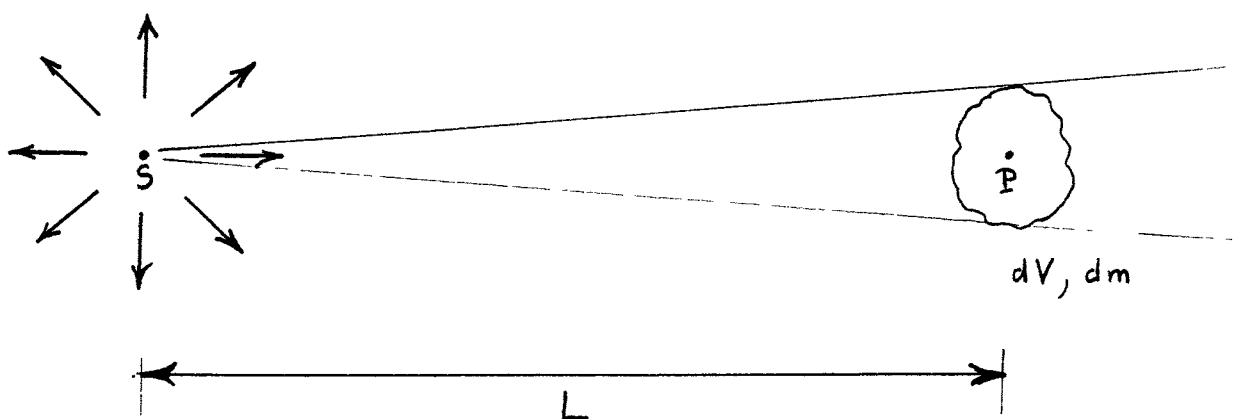
La dose absorbée D se mesure en réalité au sein d'un petit volume de matière (soit dV), de masse dm , centré au point P. Elle se définit comme étant l'énergie communiquée par les photons à l'unité de masse de matière dans le volume dV :

$$D = \frac{E}{dm}$$

Si l'on raisonne sur un intervalle de temps égal à l'unité, on définit le débit de dose \dot{D}

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Le débit de dose \dot{D} est donc proportionnel au nombre de photons traversant dV par unité de temps.



Finalement, \dot{D} est proportionnel à l'angle solide Ω sous lequel le volume dV est vu depuis la source S . L'angle solide Ω , pour un volume dV donné, est inversement proportionnel au carré de la distance L et l'on peut écrire :

Le débit de dose \dot{D} , mesuré au point P , est inversement proportionnel au carré de la distance entre P et la source S .

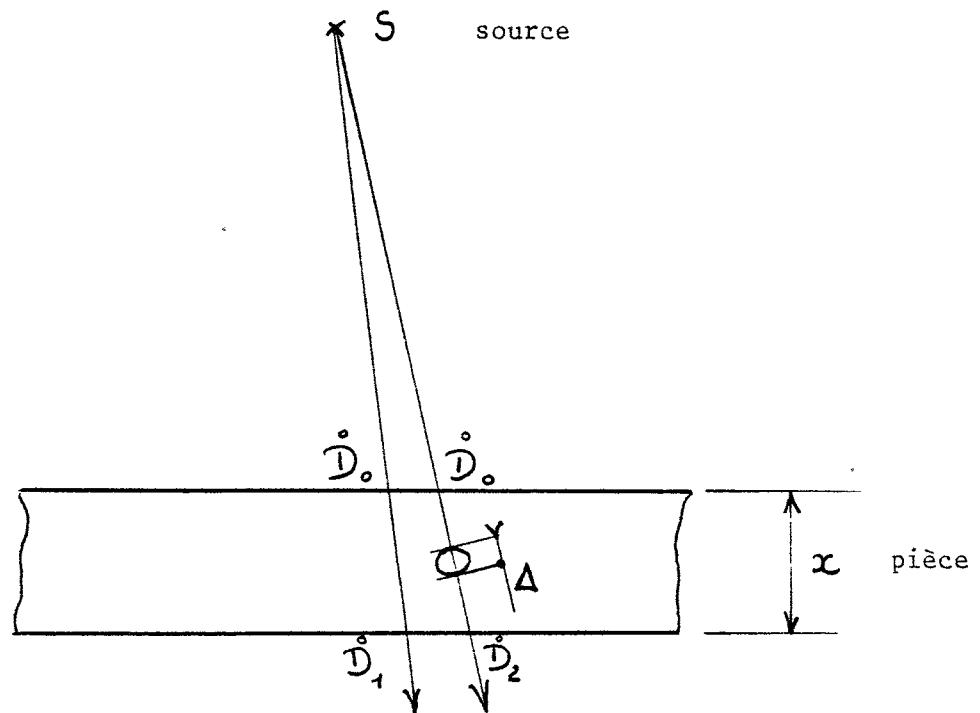
Le débit de dose s'exprime le plus souvent en $\text{rad} \times \text{h}^{-1}$ ou en $\text{mrad} \times \text{h}^{-1}$

Entre \dot{D}_1 , mesuré au point P_1 situé à la distance L_1 de la source, et \dot{D}_2 mesuré au point P_2 situé à la distance L_2 de la source, on peut écrire :

$$\dot{D}_1 \times L_1^2 = \dot{D}_2 \times L_2^2$$

II-Principe des contrôles radiologiques.

1-Prise de cliché.



Une pièce d'épaisseur x , présentant un défaut d'épaisseur Δ , est irradiée par une source ponctuelle. Le débit de dose sur la face antérieure de la pièce est presque uniforme et vaut $\overset{\circ}{D}_0$. L'atténuation due à l'épaisseur x conduit à un débit $\overset{\circ}{D}_1$ derrière la pièce :

$$\overset{\circ}{D}_1 = \overset{\circ}{D}_0 e^{-\mu x}$$

La présence d'un défaut conduit à l'apparition d'un débit de dose différent. Dans le cas où la matière présente à l'intérieur du défaut est un gaz, on peut négliger l'atténuation du rayonnement dans l'épaisseur du défaut et l'on a :

$$\overset{\circ}{D}_2 = \overset{\circ}{D}_0 e^{-\mu(x-\Delta)}$$

$\overset{\circ}{D}_2$ est supérieur à $\overset{\circ}{D}_1$ puisque l'épaisseur Δ ne donne pas lieu à une atténuation du rayonnement.

Le contraste avec lequel apparaît le défaut se mesure en faisant le rapport :

$$\frac{\overset{\circ}{D}_2}{\overset{\circ}{D}_1} = \frac{e^{-\mu(x-\Delta)}}{e^{-\mu x}} = e^{\mu \Delta}$$

Le résultat est indépendant de x . Le contraste défaut est donc, en théorie, indépendant de l'épaisseur totale radiographiée : la détection d'un défaut d'épaisseur Δ donnée ne dépend que de μ (c'est-à-dire du matériau dont est constitué la pièce et de l'énergie du rayonnement cf. p.15). Un défaut d'épaisseur 1mm doit être aussi facile à mettre en évidence dans une paroi de 50mm d'épaisseur que dans une paroi de 5mm d'épaisseur, pourvu que, dans les deux cas, l'énergie du rayonnement soit la même et que le matériau radiographié soit identique.

Bien que cette démonstration, toute théorique, mérite d'être nuancée (cf. p.26) elle souligne une caractéristique fondamentale du contrôle radiographique. Nous allons illustrer cela par un exemple.

Dans une pièce de 50 à 100mm, on détecte aisément des défauts dont la taille vaut 1 à 2% de cette épaisseur, ce qui représente 1mm environ.

Une conclusion hâtive consisterait à dire que dans une pièce de 5mm d'épaisseur, nous pourrions mettre en évidence des défauts de 0,1mm en utilisant la même énergie du rayonnement. Si l'on tente l'essai, on se rend compte qu'il est en fait très difficile de mettre en évidence des défauts dont l'épaisseur vaut 6 % de celle de la pièce, soit 0,3mm. Ce résultat est la conséquence de la règle que nous avons démontrée : le contraste d'un défaut d'épaisseur donnée n'est théoriquement pas meilleur quand l'épaisseur radiographiée est réduite.

2-Visualisation de l'image radiante.

Le rayonnement qui, derrière la pièce, indique la présence ou l'absence de défauts, n'est malheureusement pas visible directement. Il est même dangereux pour les êtres vivants. Cette image invisible de la pièce est nommée image radiante.

La visualisation du résultat se fait :

-soit à l'aide d'un écran fluorescent placé derrière la pièce. Si l'on observe cet écran directement, on dit que l'on fait de la radioscopie. Si l'on filme cet écran à l'aide d'une caméra de télévision, on fait de la radioscopie télévisée,

-soit à l'aide d'un film placé derrière la pièce. C'est le principe de la radiographie.

Dans la pratique, c'est cette dernière solution qui est adoptée dans presque tous les cas. C'est une technique coûteuse (prix des films, prix et temps de développement), mais c'est la technique qui donne la meilleure "qualité d'image", c'est-à-dire la plus grande finesse dans l'observation des défauts fins.

Simultanément, la radiographie offre l'avantage capital de fournir un document permanent, facile à manipuler et à observer : on l'appelle film, ou cliché, ou radiogramme, ou radio. Nous verrons l'importance de ce document en C.N.D.

Les principales caractéristiques des films radiographiques sont :

- support transparent,
- émulsion sur les deux faces (bicouches),
- sensibles aux X, γ et à la lumière blanche (manipulation en pochette ou cassette).

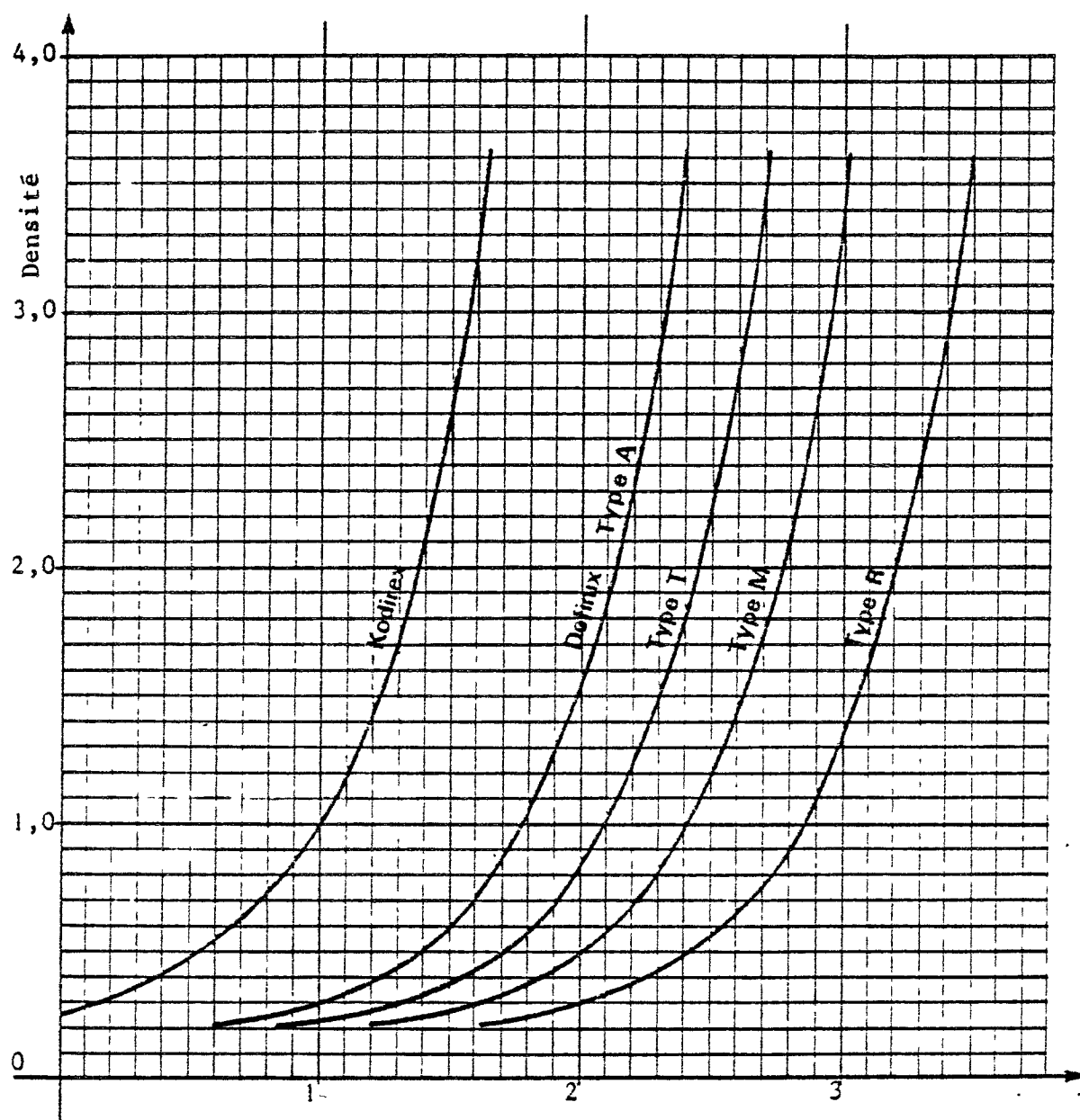
Un manque de matière conduit à une irradiation localement plus forte du film, donc à l'apparition d'une tache plus sombre, après développement : on dit qu'en ce point, la densité du film est supérieure.

Chaque type de film est caractérisé par une courbe donnant la densité (après développement) en fonction de l'exposition ou de la dose D absorbée. Ces courbes, nommées courbes caractéristiques, permettent de juger la rapidité et le contraste de chaque type d'émulsion.

2.1. Notion de contraste.

Nous avons dit précédemment que le contraste donné par un défaut était représenté par le rapport D_2/D_1 des deux débits de dose derrière le défaut (soit D_2) et derrière la pièce saine (soit D_1). Pour une prise de cliché de durée donnée, on peut écrire :

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{D_2}{D_1}$$



log Exposition ou
log Dose absorbée

Tension : 250 kV

Filtration : 5 mm Cu X Directs

Développement : LX24-5 mn - 20°C

Densité = f (lg E)

Courbes caractéristiques des films Kodak.

Nous avons vu que ce contraste, pour un défaut d'épaisseur donnée et pour un rayonnement donné, était une constante :

$$\frac{D_2}{D_1} = k$$

$$\log D_2 - \log D_1 = k'$$

Les courbes caractéristiques sont souvent données en fonction du log de l'exposition (exposition et dose absorbée sont des quantités très voisines). Dans ces coordonnées, le contraste donné par un défaut se représente, en abscisse, par une différence constante (pour un type de rayonnement donné).

La courbe caractéristique permet d'évaluer la variation de densité donnée par le défaut sur le film.

On définit deux contrastes :

a) le contraste de l'image radiante est le rapport D_2/D_1 des doses derrière la pièce en deux points différents. On préfère souvent parler en quantités logarithmiques et le contraste devient :

$$\log D_2 - \log D_1$$

On l'appelle encore "contraste-objet".

b) le contraste de l'image photographique entre deux points est la différence d_2-d_1 des deux densités. On l'appelle encore contraste-film.

L'observation des courbes caractéristiques nous révèle que le contraste de l'image photographique d'un défaut est d'autant meilleur que l'on travaille à densité élevée. Ce point est excessivement important.

2.2. Notion de rapidité.

Un film nécessitant une exposition plus faible pour l'obtention d'une densité donnée sera dit plus rapide qu'un autre. Le prix du contrôle sera donc moins élevé, mais la qualité d'image moins bonne (à cause de la taille du grain).

Pour terminer l'étude des films radiographiques, il faut signaler que les émulsions sont en fait peu sensibles aux photons X ou γ . Dès que l'on utilise des photons énergétiques ($E > 100$ keV) on place le film entre deux écrans de plomb qui arrêtent le rayonnement en partie et réémettent des rayonnements plus mous (photons mous, électrons). Ces écrans sont appelés renforceurs ou métalliques. Le bon état de surface de ces écrans est un facteur important pour l'obtention d'une image parfaite. L'épaisseur de ces écrans varie, suivant le type de rayonnement employé, entre 0,05 et 0,20 mm.

Les films du commerce ont pour format :

10 x 40 cm

15 x 40 cm

30 x 40 cm

3- La qualité de l'image.

Lors de chaque prise de cliché, on pose sur la pièce une petite surépaisseur constituée du même métal. La vision de cette surépaisseur sur le cliché atteste que la qualité d'image est suffisante.

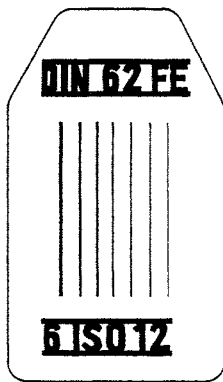
Les indicateurs de qualité d'image (I.Q.I.) français sont constitués de gradins percés de trous.

Les I.Q.I. allemands sont constitués de fils de différents diamètres.

Avec les I.Q.I. français (norme AFNOR) on calcule pour chaque prise de cliché un indice de sensibilité exprimé en % :

$$s = \frac{\text{diamètre du plus petit trou vu}}{\text{épaisseur de la pièce radiographiée}} \times 100$$

On obtient des indices voisins de 4% pour les pièces minces et voisins de 1% pour les pièces dont l'épaisseur dépasse 80mm.



Indicateurs de qualité d'image

recommandé par l'INSTITUT INTERNATIONAL DE LA SOUDURE

IQI à fils

constitués d'une série de fils de diamètre croissant enrobés dans une mince couche de matière transparente aux rayons X.

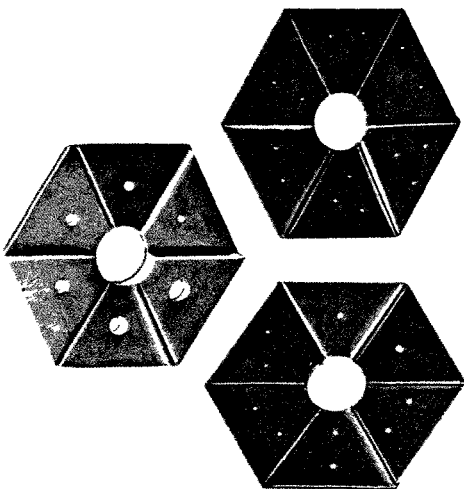
Norme DIN 54 109

Fils	1/7		6/12		10/16	
	diamètre		diamètre		diamètre	
1	3,20	Utilisation de 30 à 200 mm	1,00	Utilisation de 8 à 80 mm	0,40	Utilisation de 0 à 40 mm
2	2,50		0,80		0,32	
3	2,00		0,63		0,25	
4	1,60		0,50		0,20	
5	1,25		0,40		0,16	
6	1,00		0,32		0,13	
7	0,80		0,25		0,10	

IQI à gradins

et trous utilisables pour l'acier conformes à la

norme française AFNOR NF A 04 304



Plages	H3		HA		HB		HC	
	Epaisseur plage diamètre trous mm		Epaisseur plage diamètre trous mm		Epaisseur plage diamètre trous mm		Epaisseur plage diamètre trous mm	
1	0,125	Utilisation de 5 à 15 mm	0,32	Utilisation de 10 à 30 mm	0,80	Utilisation de 20 à 60 mm	2,00	Utilisation de 40 à 180 mm
2	0,160		0,40		1,00		2,50	
3	0,200		0,50		1,25		3,20	
4	0,250		0,63		1,60		4,00	
5	0,320		0,80		2,00		5,00	
6	0,400		1,00		2,50		6,30	

On peut calculer l'indice s avec les I.Q.I. à fils, mais il faut prendre garde au fait qu'I.Q.I. français et allemands ne sont pas équivalents. On admet généralement que la bonne vision d'un trou équivaut à la vision d'un fil de diamètre 2 à 3 fois plus petits : les fils sont plus faciles à voir que les trous et le test est moins fin, moins précis.

La détermination d'un indice de sensibilité, opération qui permet d'apprécier globalement la finesse du contrôle, reste néanmoins partiellement subjective. Elle dépend des conditions d'observations et conduit à des résultats qui peuvent varier sensiblement d'un opérateur à l'autre.

Soulignons bien le fait que le contrôle radiographique est le seul C.N.D. qui laisse un document facilement archivable et réobservable sur lequel apparaisse directement un élément, l'I.Q.I., permettant de juger la qualité du travail du contrôleur. Il s'agit donc d'un contrôle au 2ème degré. Ce point très important sera évoqué lorsque nous procèderons à l'étude des spécifications de contrôle.

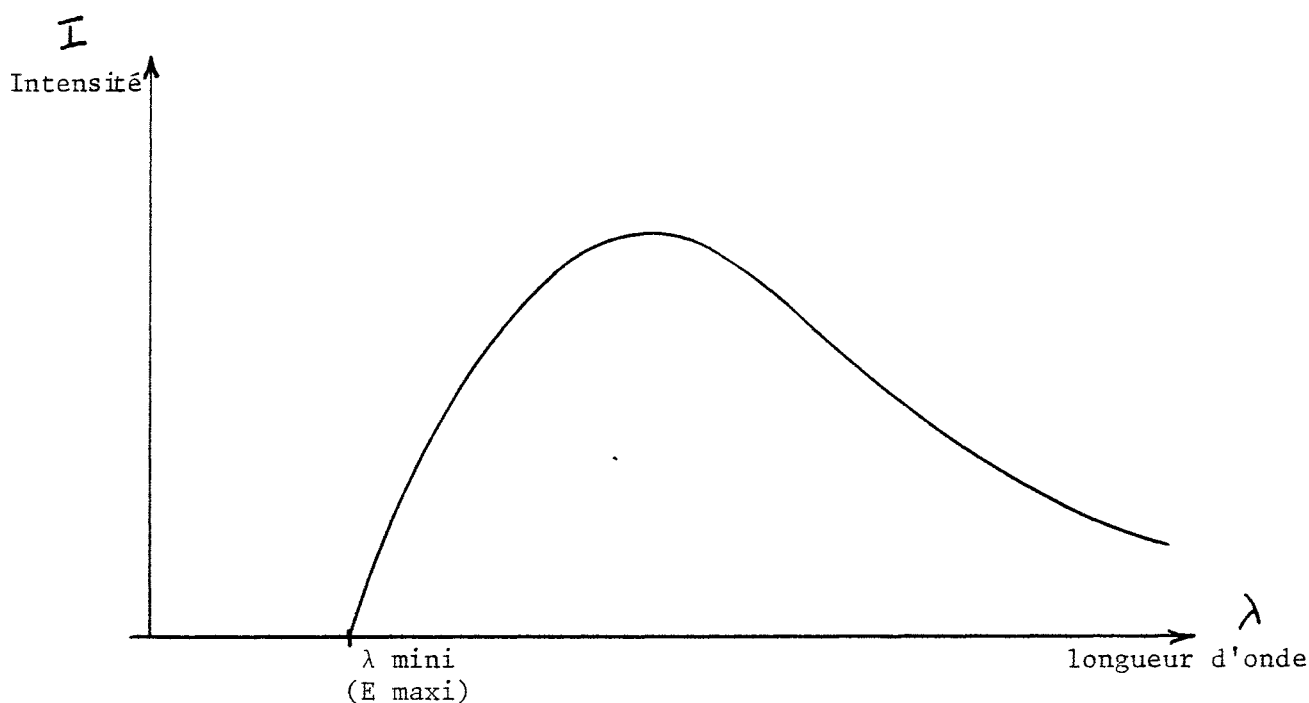
4-Productions des rayons X.

Les rayons X sont obtenus en bombardant à l'aide d'électrons une cible en métal à point de fusion élevé (tungstène). Les interactions entre les électrons incidents et la matière sont de deux types :

a) Collisions avec les électrons atomiques, ce qui conduit à un échauffement de la cible. 99% de l'énergie des électrons incidents est ainsi convertie en chaleur.

b) Interactions de freinage des électrons incidents dans le champ électrique des noyaux de la cible. L'énergie perdue au cours de chaque interaction est convertie en un photon. Si le freinage est total, le photon récupère toute l'énergie de l'électron. Si le freinage est partiel, l'énergie du photon ne représente qu'une part de l'énergie de l'électron incident.

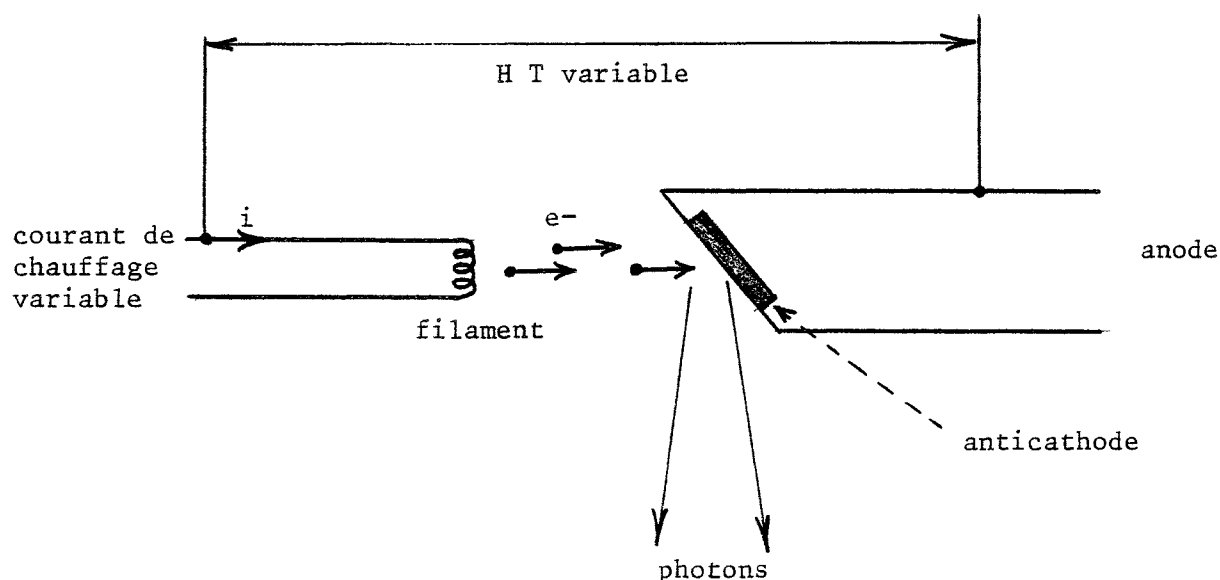
Ainsi le rayonnement émis n'est pas monochromatique, bien que les électrons arrivant sur la cible aient tous la même énergie. L'énergie des électrons incidents représente donc l'énergie des photons les plus durs ($E = h\nu$ maximum). Des photons présentant toutes les énergies inférieures à E sont présents. A l'énergie la plus grande (E maxi) correspond la longueur d'onde la plus faible. On obtient un spectre polychromatique continu.



Le polychromatisme du rayonnement vient en fait modifier sensiblement l'équation d'atténuation des rayonnements par la matière, ainsi que le contraste de l'image radiante derrière un défaut.

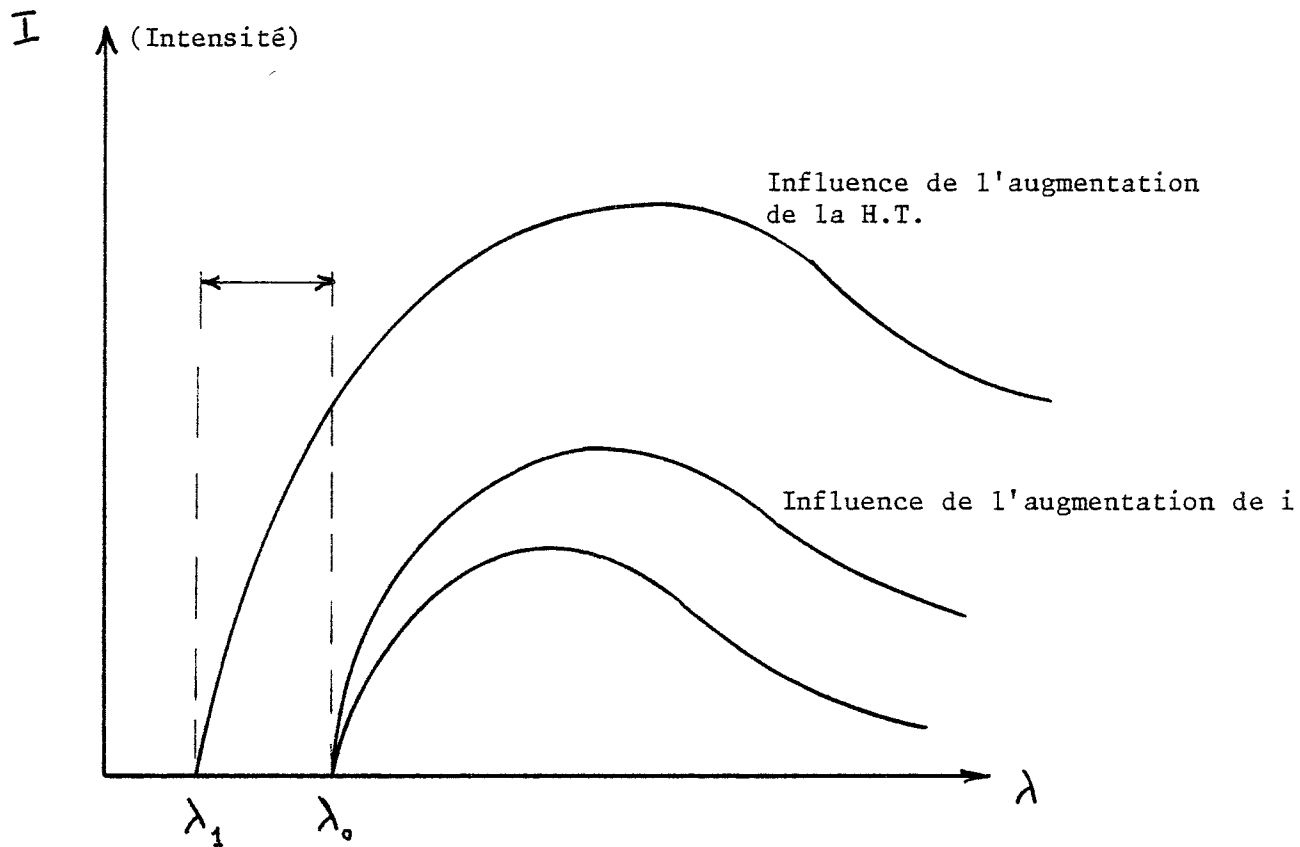
A) Le tube à rayons X.

Les électrons, émis par un filament chauffé, sont accélérés par une différence de potentiel que l'on peut ajuster. Cathode et anode sont enfermées dans une enceinte vidée de tous gaz. La cible métallique brasée sur l'anode s'appelle anticathode. Les photons sortent de l'ampoule par une fenêtre en beryllium (en verre sur les tubes anciens).



Le choix de la haute tension détermine l'énergie du rayonnement (sa dureté). Rappelons que l'augmentation de l'énergie du rayonnement correspond à une augmentation de la pénétration dans la matière, c'est-à-dire à la possibilité de radiographier des pièces plus épaisses, ou constituées de matériaux plus denses, mais cela entraîne en même temps une diminution du contraste $e^{\mu\Delta}$ donné par un défaut d'épaisseur Δ (cf.p.18).

Le choix du courant de chauffage détermine le courant électronique dans le tube et, par voie de conséquence, le flux de photons émis par le tube.



L'augmentation de la haute tension introduit dans le spectre du tube des longueurs d'onde nouvelles, plus courtes donc plus pénétrantes. L'augmentation du courant de chauffage i ne modifie pas le spectre, mais augmente le débit de dose délivré par le tube.

Les principaux avantages des tubes à rayons X sont :

- possibilité de modifier l'énergie des photons émis,
- possibilité de modifier l'intensité du faisceau,
- sécurité pour le personnel : si l'on cesse d'alimenter le tube, il devient inoffensif,
- possibilité d'obtenir de forts débits de dose à 1 mètre (de l'ordre de $1000 \text{ rad} \times \text{h}^{-1}$) ce qui permet des temps de pose courts.

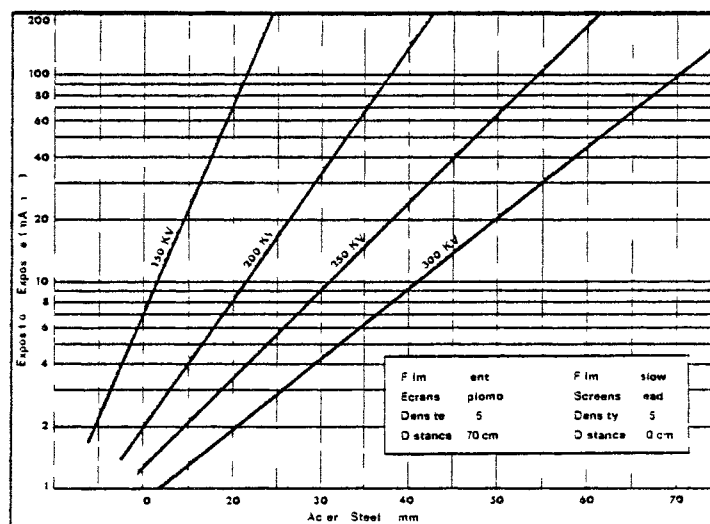
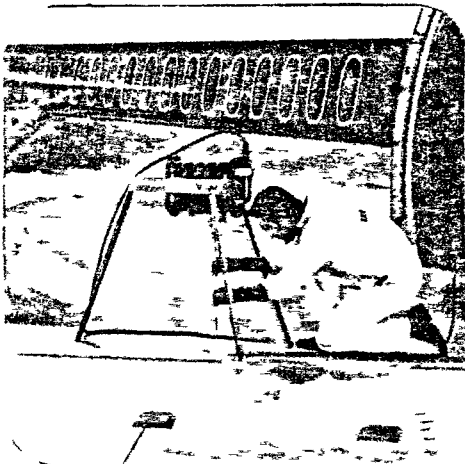
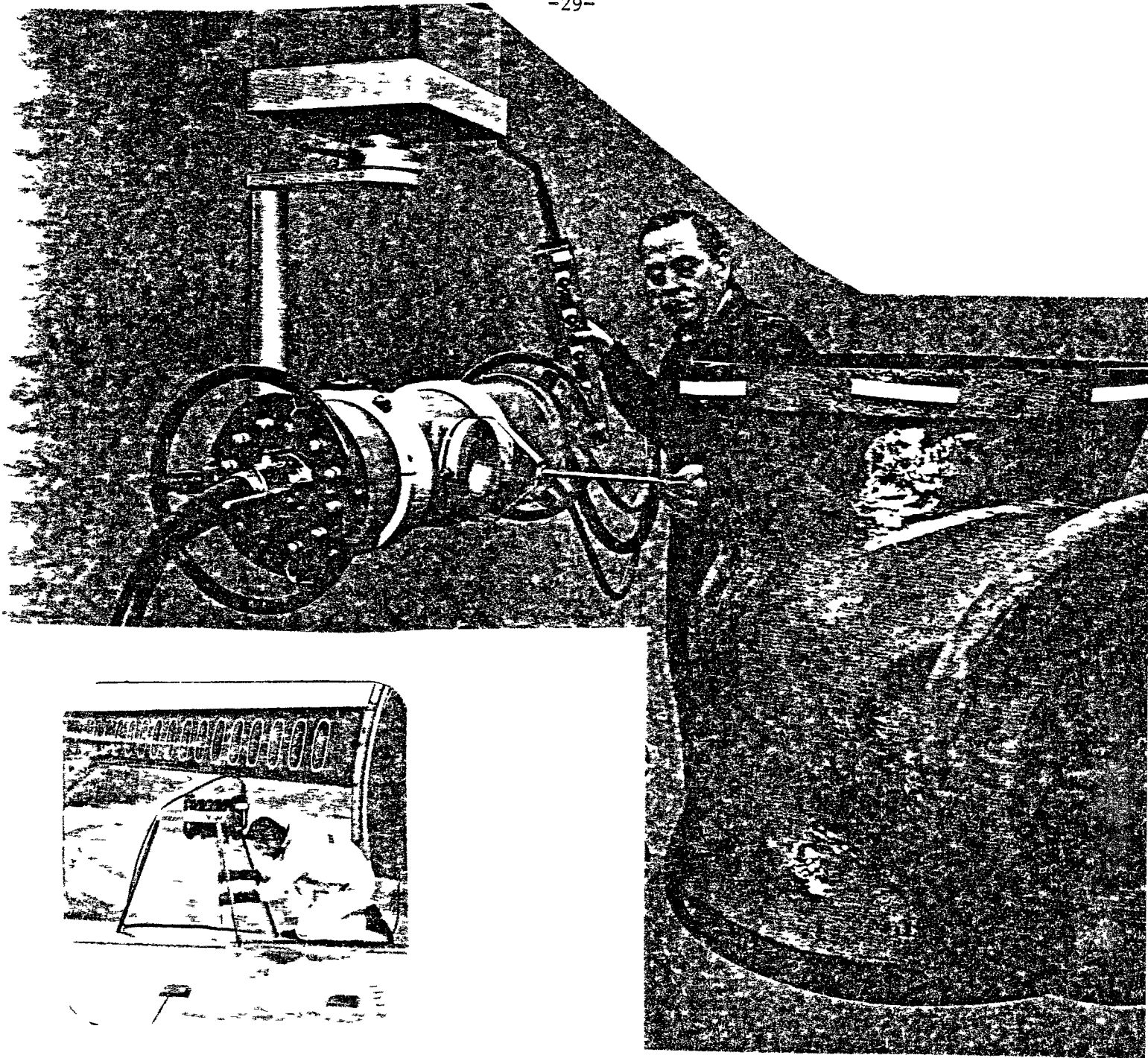


Fig 1 Abaque de temps de pose

Type d'appareil	150 kV		160 kV	200 kV
Modèle	1511	1531	1631	2021
Régime des kV	45-150	45-150	50-160	60-200
Régime des mA	1-5	1-10	1-5	1-8
Angle du faisceau	40°	40°	40°	40 x 60°
Foyer effectif	1,5 mm	2,5 mm	1,5 mm	2,3 mm
Filtration Al	1,6 mm	1,6 mm	1,6 mm	2,5 mm
Poids	Cat. B	Cat. B	Cat. B.	Cat. C

Type d'appareil	225 kV	250 kV	300 kV	
Modèle	2271	2501	3001	
Régime des kV	70-225	75-250	90-300	
Régime des mA	1-8	1-8	1-6	
Angle du faisceau	40 x 60°	40 x 60°	40 x 57°	
Foyer effectif	2,9 mm	2,9 mm	3,0 mm	
Filtration Al	2 mm	3 mm	5 mm	
Poids	Cat. C	Cat. D	Cat. E	

Fig 5 225 kV
mod. 2271

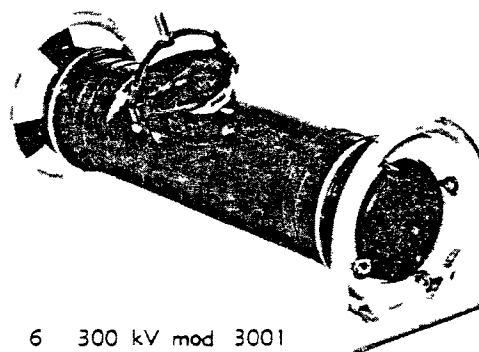


Fig 6 300 kV mod 3001

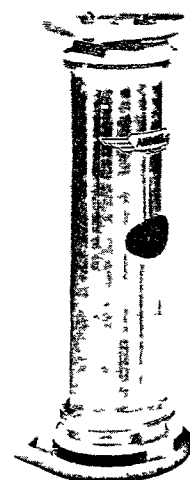


Fig 7 100 kV
mod 1001

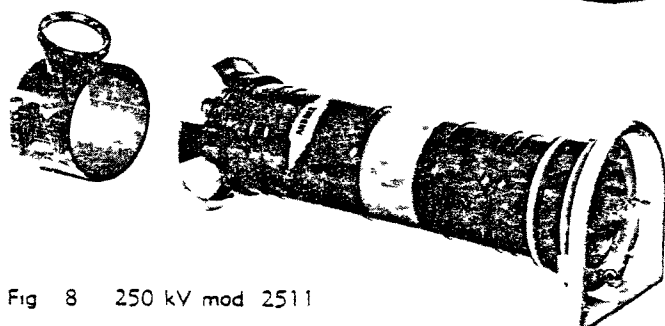


Fig 8 250 kV mod 2511

Type d'appareil	100 kV	160 kV	200 kV
Modèle	1001	1621	2031
Régime des kV	30-100	50-160	65-200
Régime des mA	1-5	1-5	1-5
Angle du faisceau	40 x 360°	30 x 360°	40 x 360°
Foyer réel	3 mm	3,5 mm	3,9 mm
Filtration Al	2 mm	6 mm	7 mm
Poids	Cat. A	Cat. B	Cat. C

Type d'appareil	200 kV	250 kV	300 kV
Modèle	2041	2511	3011
Régime des kV	65-200	75-250	90-300
Régime des mA	1-5	1-5	1-4,5
Angle du faisceau	45 x 360°(1)	35 x 360°	35 x 360°
Foyer réel	1 x 3,8 mm	4,8 mm	4,8 mm
Filtration Al	7 mm	15 mm	19 mm
Poids	Cat. C	Cat D	Cat E

(1) Faisceau orthogonal.

	150 kV	
Modèle	1551	1561
Régime des kV	50-150	50-150
Régime des mA	1-15 1-5	1-10 1-4
Foyers	17 mm 5 mm	19 mm 5 mm
Angle du faisceau	40 x 360° (circulaire)	240° (sphérique)
Longueur d'anode	30 cm 60 cm 100 cm	30 cm 60 cm 100 cm
Poids	Cat. D	Cat. D

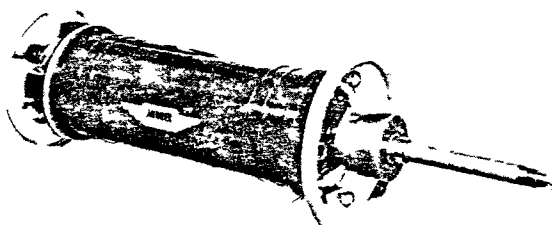


Fig 9 150 kV mod 1551
anode de 30 cm

Les inconvénients des tubes sont :

- nécessité d'une alimentation électrique,
- nécessité de prévoir un circuit d'eau de refroidissement,
- encombrement, poids,
- faisceau de rayonnement étroit (cône de 60°) ne permettant, en général, de ne faire qu'un seul cliché à la fois (les tubes panoramiques ou les tubes à anode longue sont rares et fragiles).
- prix d'achat assez élevé (200 000 F à 400 000 F en 1980),
- nécessité d'un préchauffage quotidien du tube (sous peine de détérioration).

A l'heure actuelle, on utilise industriellement des tubes de 150 kV, 200 kV, 300 kV. Les tubes les plus gros atteignent 400 kV et permettent de radiographier jusqu'à 80mm d'acier.

B) Le bétatron.

Le tube d'accélération est constitué d'un tore en verre ou en porcelaine dans lequel règne un vide très poussé . Ce tore est placé entre les pôles d'un électro-aimant qui produit un champ magnétique périodique servant à maintenir les électrons sur une orbite circulaire à l'intérieur du tore et à les accélérer. Ainsi, dans un bétatron de 24 MeV, l'orbite est parcourue environ 350 000 fois en 1,4 ms. Les électrons sont alors dirigés sur l'anticathode. Ils produisent des photons très énergétiques ayant même direction que les électrons.

Ces appareils, peu répandus, permettent de radiographier des épaisseurs importantes (600 mm d'acier, plus de 1m de béton).

C) L'accélérateur linéaire.

Les électrons sont accélérés dans un guide d'onde par une onde électromagnétique porteuse. Les électrons sont dirigés vers une cible métallique où ils produisent des photons X par freinage. On trouve des A.L. de 1 MeV, 2 MeV,

LINEAR ELECTRON ACCELERATORS

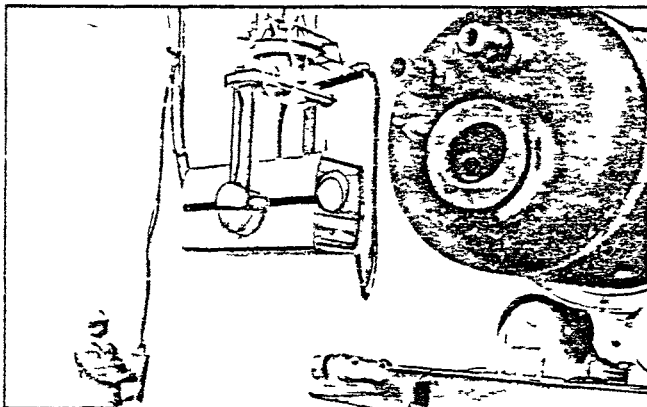
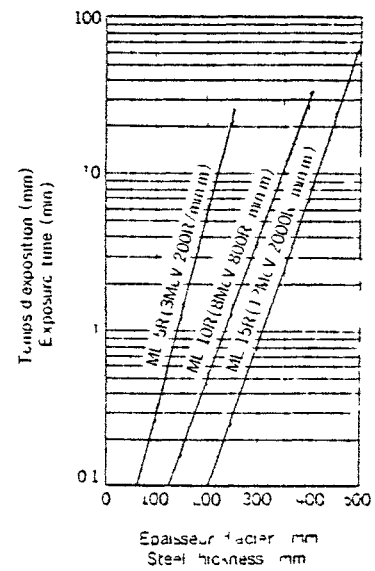
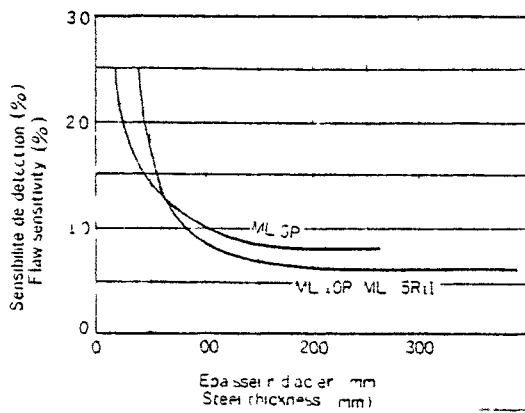
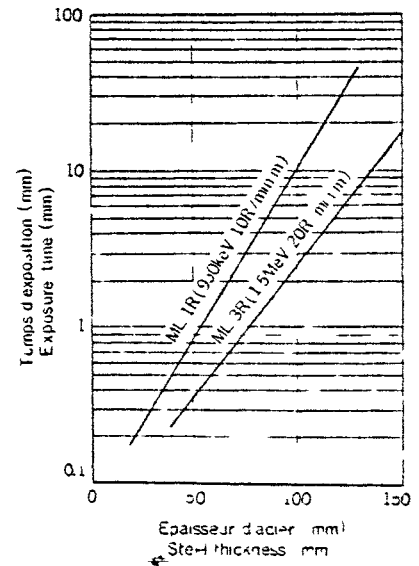
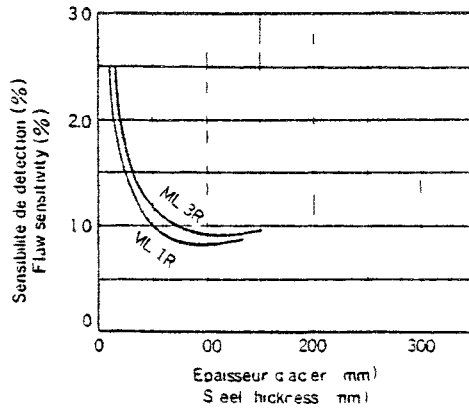


Fig 12 Type ML 1R

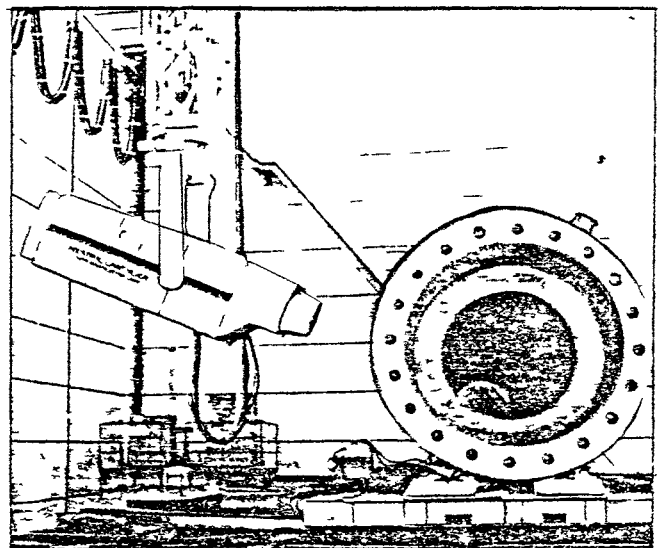


Fig 13 Type ML 10R

8 MeV, 15 MeV... Les accélérateurs de 8 MeV sont les plus courants et permettent de radiographier des épaisseurs d'aciers allant jusqu'à 400mm en moins d'une demi-heure. Les débits de dose sont énormes (environ 30 000 rad x h⁻¹ à 1m dans l'axe du faisceau). Ces appareils ne sont donc utilisables qu'à l'intérieur de locaux d'irradiation dont les parois, en béton présentent des épaisseurs qui dépassent 2 mètres.

- L'énergie du rayonnement ne peut pas être modifiée.
- Le faisceau de rayonnement est encore plus réduit que dans le cas des tubes à rayons X (14° environ).
- le prix de l'installation complète est très élevé : pour l'amortissement de l'ensemble A.L. + local d'irradiation, il faut compter entre 1000 et 2000 F de l'heure.

5-Mise en oeuvre des rayons γ .

Les rayons γ sont produits par la désintégration spontanée de certains noyaux instables. A l'heure actuelle, les radioisotopes utilisés sont obtenus artificiellement : sous un faible volume, les radioisotopes artificiels peuvent présenter de fortes activités, contrairement aux radioisotopes naturels.

Les caractéristiques des sources sont les suivantes :

- l'énergie du rayonnement n'est pas réglable. Chaque radioisotope a son spectre propre (généralement polychromatique).
- l'intensité (ou le débit de dose) à 1 mètre de la source n'est pas réglable. Elle décroît exponentiellement au cours du temps. On caractérise la source par son activité qui s'exprime en curies (Ci) ou en becquerels (Bq), qui est l'unité légale.

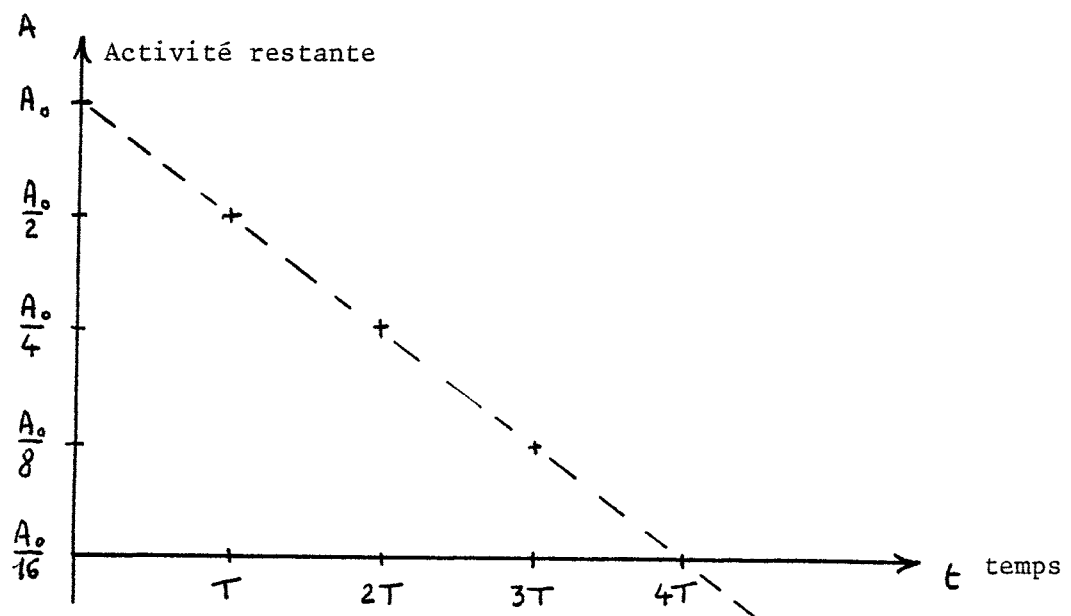
1 Bq correspond à l'activité d'une source au sein de laquelle se produit 1 désintégration par seconde. On a :

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}.$$

La loi de décroissance de l'activité est du type

$$A = A_0 e^{-kt}$$

où A est l'activité au temps t , A_0 l'activité initiale, et k une constante. Nous avons déjà rencontré ce type d'équation lorsque nous avons étudié l'atténuation du rayonnement électromagnétique dans la matière. La décroissance de l'activité en fonction du temps est exponentielle décroissante. En coordonnées semi-logarithmiques, on obtient une droite. On définit la période T du radio-élément : c'est la durée au bout de laquelle l'activité est réduite de moitié.



On peut écrire $A = A_0 e^{-0,693 \frac{t}{T}}$

La source, enfermée dans une capsule puis dans un porte-source, est isolée dans un conteneur (ou projecteur) aux parois très absorbantes.

SOURCES EUROPÉENNES (CAPSULE)

DESCRIPTION

Les sources d'IRIDIUM 192 en provenance de la communauté européenne sont encapsulées après irradiation, sous acier inoxydable soudé par bombardement électronique. Dans des conditions normales d'utilisation, elles présentent une résistance suffisante pour éviter toute dispersion de matières radioactives et toute possibilité de contamination.

Après encapsulage, elles subissent un contrôle sévère d'étanchéité et de contamination extérieure.

Les dimensions de l'élément actif dépendent de l'activité de la source demandée. Les valeurs standard disponibles sont données par le tableau ci-après.

DIMENSIONS DISPONIBLES

d (mm)	h (mm)	Activ. Max (Ci)	d (mm)	h (mm)	Activ. Max (Ci)
0.5	0.5	3			
1.0	1.0	8	2.0	3.0	75
1.2	1.2	13	3.0	1.0	55
1.0	1.0	23	3.0	3.0	140
1.0	2.0	40	3.0	6.0	160

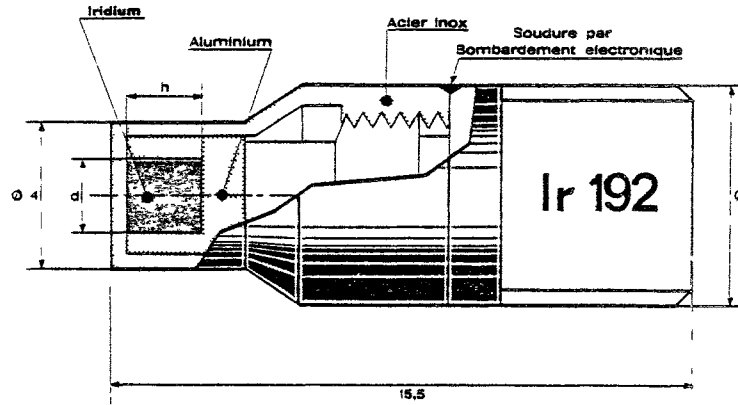


Fig. 3 : Coupe d'une source standard

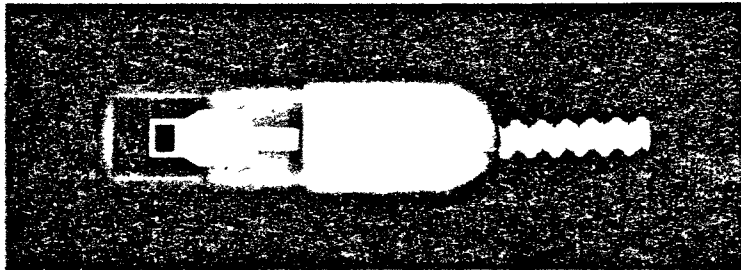


Fig. 4 : Radiographie d'un porte-source

PORTE-SOURCES

En radiographie gamma, les sources radioactives, afin d'obtenir une meilleure protection mécanique, sont placées dans des porte-sources. Ceux-ci assurent en même temps une éjection plus facile et une possibilité d'un échange rapide et aisé.

Les porte-sources sont, de préférence, conçus de façon à réduire les angles morts et à conserver un rayonnement le plus isotrope possible. De plus, ils doivent être très légers pour être éjectés à grande distance au moyen de télécommandes, manuelles ou électriques, dans des conduits d'éjection disposés parfois de façon sinueuse.

PROJECTEURS DE RADIOGRAPHIE GAMMA

Les appareils de radiographie gamma par IRIDIUM 192 sont d'un prix peu élevé et de construction robuste. Ils sont tout particulièrement indiqués pour les travaux sur chantier. Ils permettent la mise en place des sources, rapide et simple.

RAPPEL DES RÈGLES ESSENTIELLES

auxquelles doivent répondre les
PROJECTEURS DE RADIOGRAPHIE GAMMA :

- Débit de dose moyen :
 - au contact, inférieur à 50 mR/h.
 - à 1 mètre, inférieur à 2 mR/h.
- Contrôle d'intégrité du porte-source en position stockage.
- Verrouillage du porte-source en position stockage.
- Signalisation lumineuse efficace.
- Parois non fusibles.
- Mise en place de la source au moyen de commande à distance.

Il est en même temps souhaitable que ces appareils soient conformes aux normes de transport relatives aux substances radioactives.

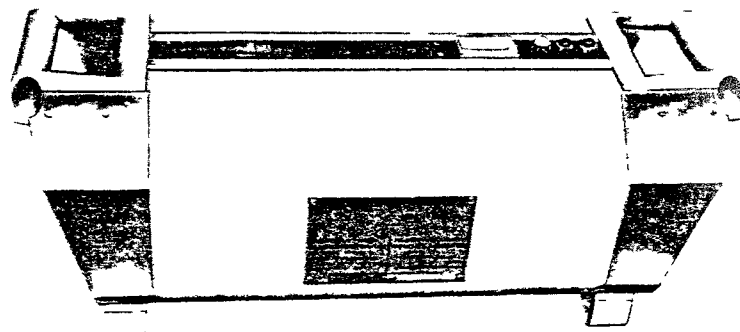


Fig. 5 : Gammagraf universel type GA

Radiographie Gamma

PROJECTEUR AUTOMATIQUE

TYPE M.G.A.

GENERALITES

L'emploi de source a activité importante nécessite l'utilisation d'un appareil de très grande sécurité demandant le minimum d'intervention du Personnel. L'appareil M.G.A. entièrement automatique remplit parfaitement cette fonction.

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

- Capacité en Ir 192 selon Normes .

	MGA/78 A	MGA/155 A
France	100 Ci	200 Ci
Grande-Bretagne	150 Ci	300 Ci
Allemagne	300 Ci	400 Ci

Débit d'exposition au contact du Gammagraf en mR/h par Curie

MGA/ 78 A 1,00 mR/h

MGA/155 A 0,50 mR/h

Blindage en Uranium inactif

Porte source léger, et de petites dimensions

Dispositif d'obturation a ouverture manuelle et fermeture automatique

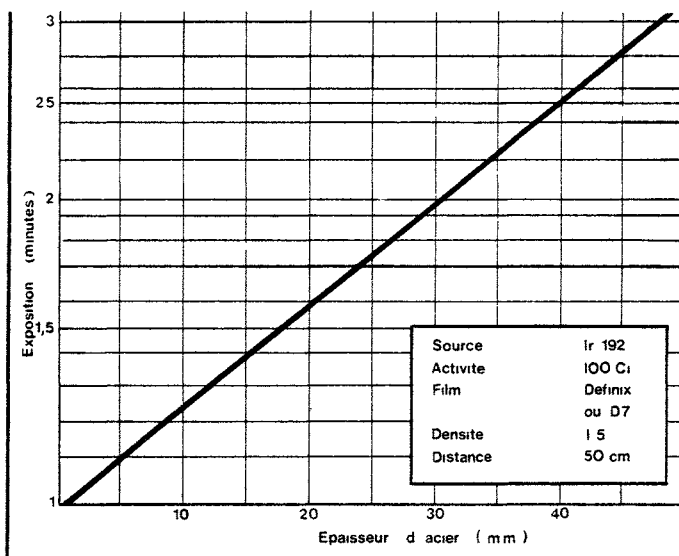
Contrôle automatique de la position du porte-source dans son intégrité

Signalisation lumineuse autonome alimentée par batterie

Alimentation des batteries par chargeur séparé

Conforme aux conventions internationales de transport Type B N° F 118

Conforme a la réglementation aux normes Françaises et étrangères



UTILISATION

Chantier - Echafaudage
Atelier

APPLICATIONS

Grosse chaudronnerie
Pipe-line

DISPOSITIFS ASSOCIES

Telecommande manuelle a limiteur de couple avec ou sans signalisation lumineuse.

Telecommandes electromecaniques.

Tubes ejecteurs souples et rigides a raccordement instantane

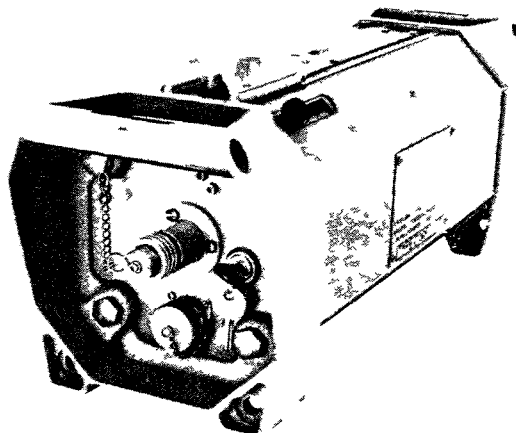
Collimateurs en Uranium panoramique ou directionnel

Embout d'irradiation globale

Dimensions	L	494 m/m
	I	170 m/m
	H	204 m/m
Poids MGA 155 A		24 kg
MGA 78 A		20 kg

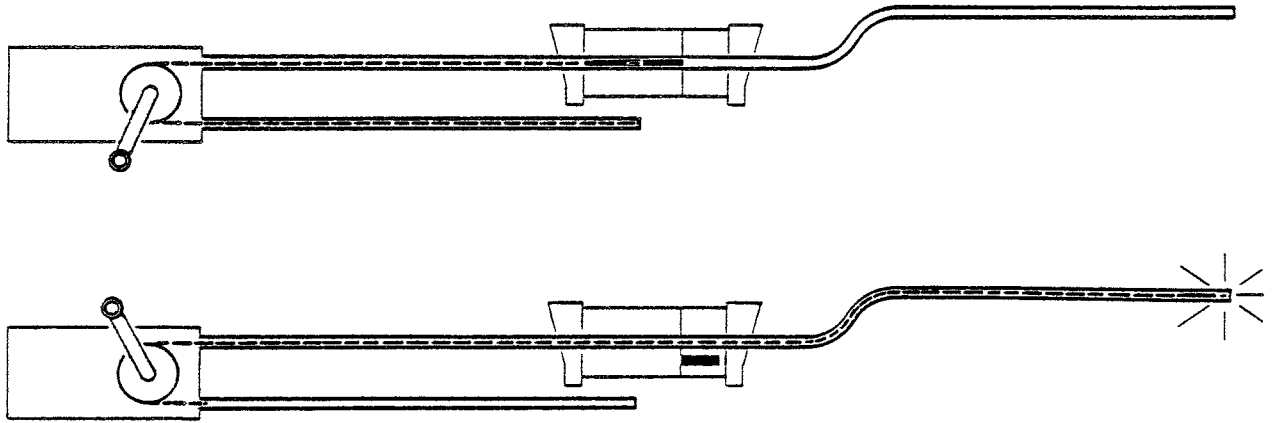
SERVICES ASSURES DANS TOUS PAYS

Mise en route
Entretien systematique
Intervention rapide de securité
Remplacement des sources par échange standard



La mise en place de la source pour la prise de cliché se fait à l'aide d'une télécommande

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



En position stockage, le porte-source contenant la source radioactive se trouve dans l'appareil. Le doigt blindé du système d'obturation pénètre dans le canal de stockage obture le faisceau et contrôle que le porte-source est bien dans son intégrité en position de protection. Le voyant lumineux vert clignote.

Pour éjecter la source hors de l'appareil à l'aide de la télécommande manuelle, il faut déverrouiller l'appareil à l'aide du levier se trouvant sur celui-ci. Dès que l'obturateur n'est plus complètement fermé, le voyant rouge clignote.

Après avoir effectué l'irradiation, le porte-source est ramené dans l'appareil qui se verrouille automatiquement. Le signal rouge ne s'éteint et le vert ne s'allume que si le porte-source est rentré complet.

La gammagraphie présente les avantages suivants :

- Il n'est pas utile de disposer d'alimentations en eau et en électricité
- Certains conteneurs sont assez maniables (17 kg).
- La source peut se positionner dans des tubes très petits.
- La source rayonne dans toutes les directions, ce qui permet la radiographie panoramique d'une cuve.
- Le prix du conteneur est assez faible (40 000 à 100 000 F 1980).

Les inconvénients majeurs sont les suivants :

- Les débits de dose à 1 mètre sont assez faibles et certaines poses sont longues (10 heures).

-La sécurité du personnel peut être menacée si l'on n'utilise pas en permanence un appareil de mesure de débit de rayonnement pour s'assurer que la source rentre correctement dans son conteneur à la fin de chaque irradiation.

-Nécessité de racheter une nouvelle source chaque fois que son activité trop réduite conduit à des temps de pose trop longs. Il en coûte au minimum 5000F à chaque achat.

Les sources les plus couramment employées sont :

L'Iridium 192 (^{192}Ir) dont le spectre de rayonnement comprend 10 raies dont les énergies s'échelonnent entre 250 et 600 keV. La période est assez courte 74j.

Le cobalt 60 (^{60}Co) dont le spectre est constitué de 2 raies d'énergies 1170 et 1330 keV (1,17 et 1,33 MeV). La période est de 5,3 années.

La constante spécifique de rayonnement gamma indique le débit de dose mesuré à un mètre d'une source d'activité unité (1Ci).

Cette constante vaut :

dans le cas de ^{192}Ir : $0,5 \text{ rad} \times \text{h}^{-1}$ à 1 mètre pour 1 Ci,

dans le cas du ^{60}Co : $1,3 \text{ rad} \times \text{h}^{-1}$ à 1 mètre pour 1 Ci.

On utilise industriellement d'autres types de sources :

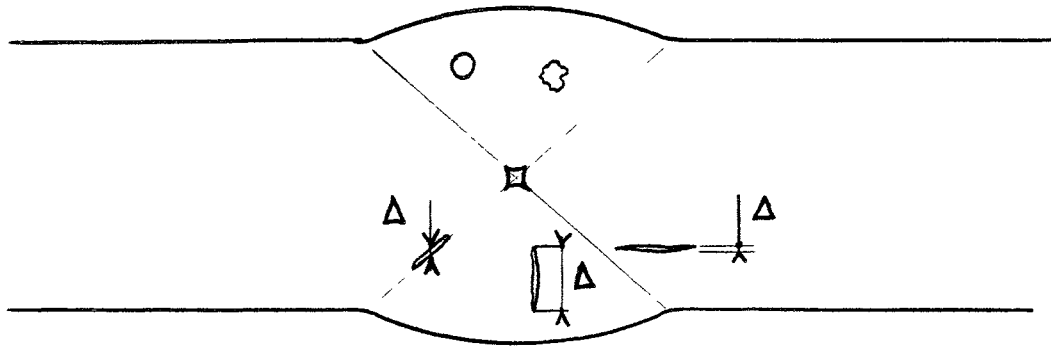
le caesium 137 (^{137}Cs) ; énergie 0,662 MeV ; période 30 ans,

le thulium 170 (^{170}Tm) ; énergie 0,084 MeV ; période 127 j.

III-Limites de la méthode.

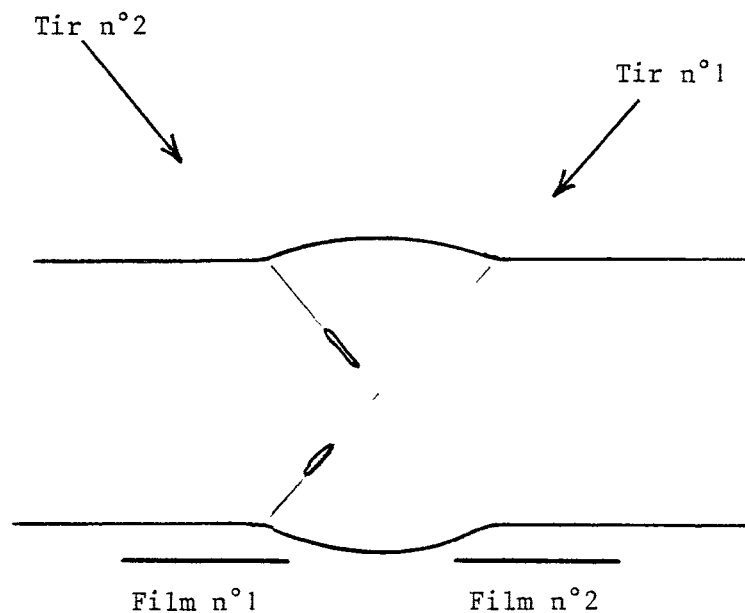
1-Taille et orientation des défauts.

Un défaut est d'autant plus facilement visible qu'il entraîne une diminution importante de l'épaisseur radiographiée.



Les défauts volumiques et linéaires (gaz, laitier) se voient généralement bien et le contraste ne dépend pas de l'orientation.

Les défauts plans (fissures, criques, arrachements lamellaires, collages) ne sont aisément visibles que si leur grande dimension est parallèle au rayonnement. Ainsi, il faudra pratiquer deux tirs supplémentaires pour détecter les collages.

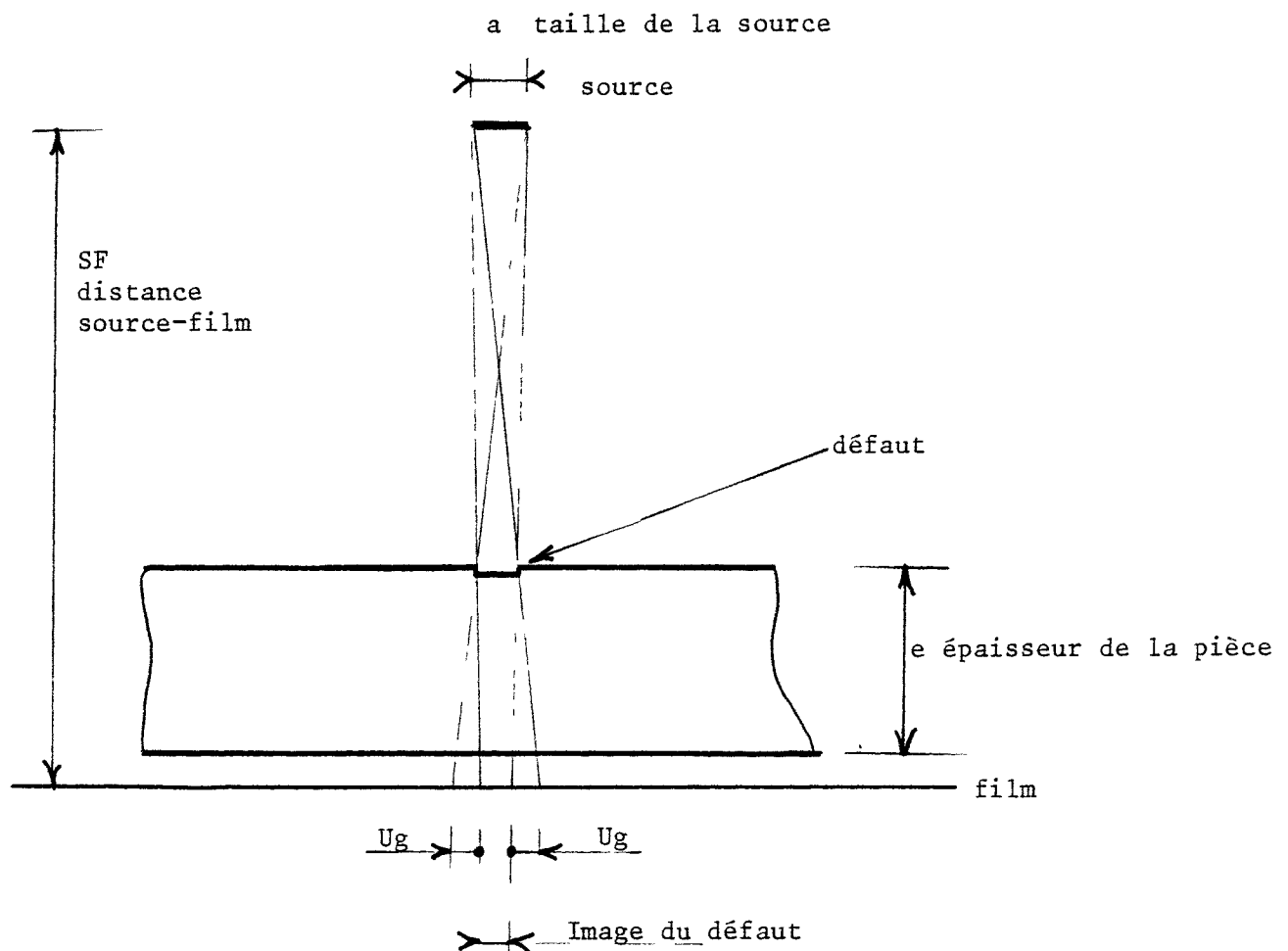


Le choix de l'orientation relative du faisceau utile de rayonnement par rapport à la pièce est donc capital. Le contrôleur est aidé par l'orientation "probable" des défauts jugés comme les plus dangereux.

Ce choix devient difficile lorsque le dessin de la pièce est complexe (pièces moulées, soudures d'angles, piquages).

2-Flou géométrique.

La source de photons n'est jamais ponctuelle : sa taille atteint plusieurs mm. Les défauts cherchés ont des dimensions souvent inférieures au mm. Les défauts sont vus, au niveau du film, avec une pénombre qui diminue la taille apparente du défaut et estompe les contours.



Calcul du flou géométrique.

Le flou géométrique, noté U_g , s'exprime en mm. La figure nous montre que la largeur de la zone floue :

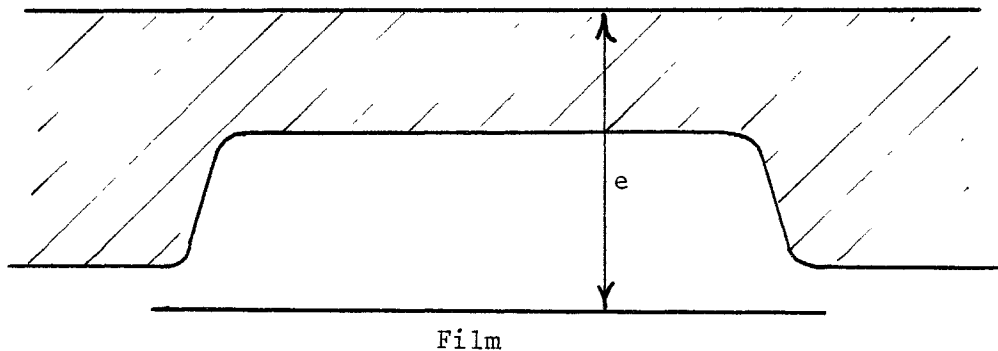
- est indépendante de la dimension du défaut,
- augmente avec l'éloignement entre le film et le défaut,
- augmente avec la taille a de la source,
- augmente lorsque la distance source-film diminue.

En C.N.D., on caractérise la prise de cliché par la notion globale de flou géométrique U_g , en se plaçant dans le cas le plus défavorable où le défaut est situé sur la face de la pièce la plus proche de la source.

On a :

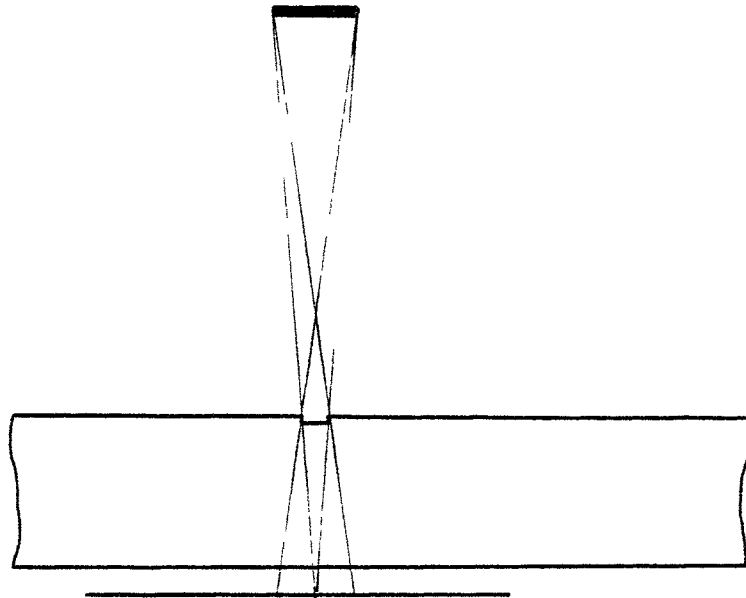
$$U_g = \frac{a \times e}{SF - e}$$

Il s'agit donc d'une valeur théorique maximale. Remarquons bien que l'épaisseur e prise en compte ici n'est pas forcément l'épaisseur de la pièce.



Sur cet exemple, on constate que l'on obtiendrait un flou bien plus faible en découpant un morceau de film pour le coller directement derrière la portion de pièce radiographiée.

A la limite, un défaut plus petit que la source peut disparaître complètement. Seul le halo de pénombre subsiste.



Le flou géométrique constitue une limitation importante à l'obtention d'une bonne qualité d'image. On le calcule théoriquement pour chaque prise de cliché. Une limite supérieure de flou géométrique est imposée par les spécifications de contrôle.

Pour diminuer U_g on peut :

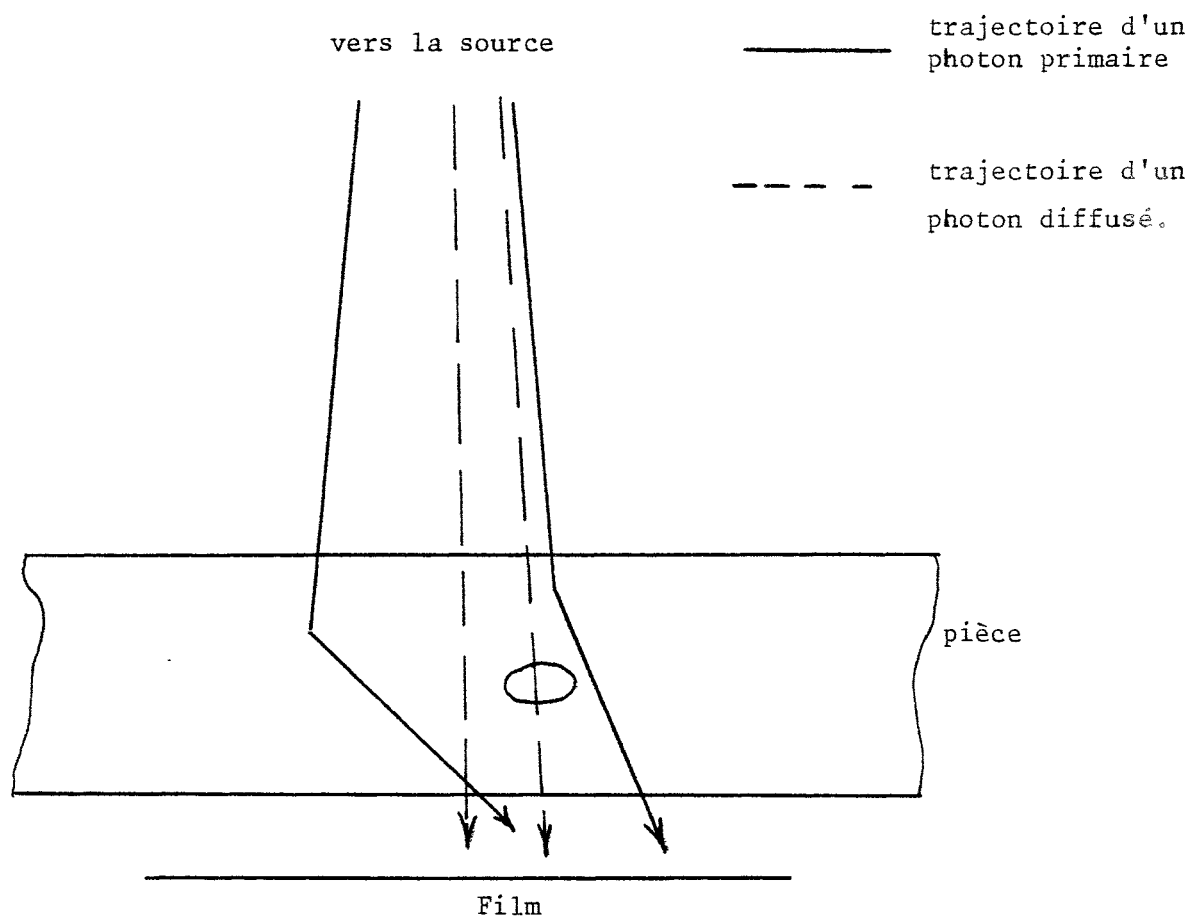
a) limiter la taille de la source ; mais on limite du même coup l'activité maximale disponible et l'on augmente la durée d'exposition.

b) augmenter SF, mais une multiplication de SF par un facteur k ne diminue U_g que par un facteur k (on admet que l'épaisseur e est faible devant SF) tandis que la durée d'exposition est multipliée par k^2 (loi du carré des distances, cf p. 17).

L'obtention d'un faible flou géométrique coûte donc toujours cher.
Remarque : Lors d'une prise de cliché, les I.Q.I. sont toujours placés sur la face de la pièce la plus proche de la source, c'est-à-dire la plus éloignée du film, de manière à se trouver dans le cas le plus défavorable où le flou géométrique est le plus grand.

3-Rayonnement diffusé.

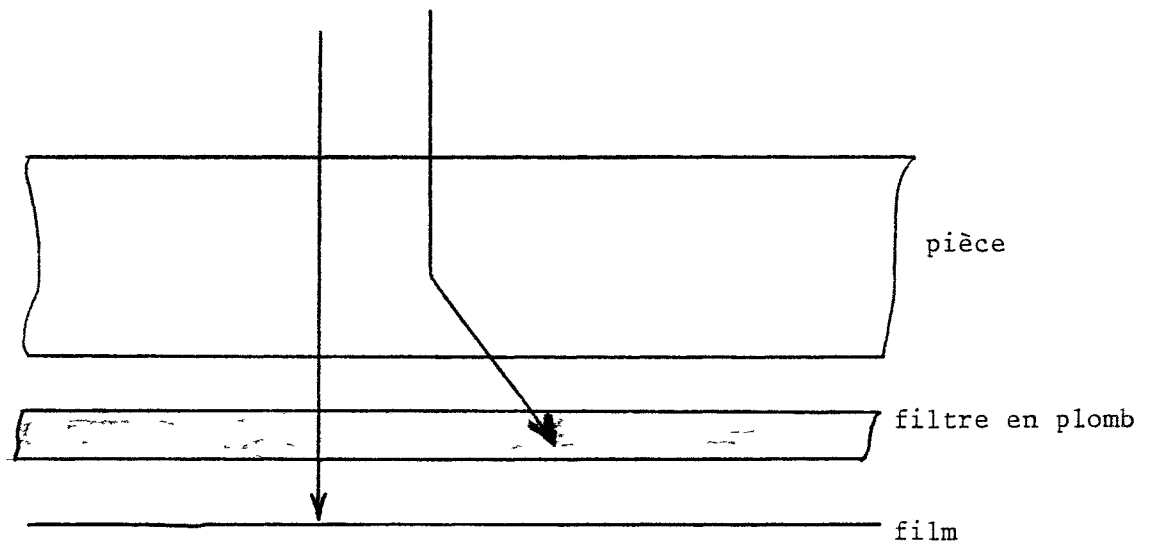
Si nous considérons de nouveau les interactions entre les photons et la matière (cf. p. 15) nous constatons que toute matière agit comme un diffuseur de rayonnement. La pièce radiographiée donne naissance à un abondant rayonnement diffusé (on dit encore secondaire) qui agit sur le film comme un fond continu et nuit à la qualité de l'image.



La proportion de diffusé derrière la pièce augmente :

- quand l'épaisseur de la pièce augmente,
- quand l'énergie du rayonnement diminue.

On élimine une partie de ce diffusé à l'aide d'un filtre placé entre la pièce et le film. Il s'agit d'une plaque absorbante (plomb) qui atténue le rayonnement diffusé moins énergétique (plus mou) et dont le trajet dans le plomb est en biais. Le filtre absorbe toutefois une partie du rayonnement primaire ce qui conduit à une augmentation de la durée d'exposition, mais à un gain certain sur la qualité d'image.



Ainsi, à l' ^{192}Ir , pour des épaisseurs d'acier supérieures à 20mm, un filtre en plomb de 1,5mm multiplie le temps de pose par 2, mais permet de voir une ou deux plages supplémentaires de l'I.Q.I. français.

4-Epaisseurs radiographiables.

En radiologie, le choix du rayonnement est limité par le souci d'avoir une durée d'exposition courte et une qualité d'image au moins aussi bonne que celle qu'imposent les spécifications.

Pour un rayonnement donné, on ne peut pas radiographier des pièces de plus en plus épaisses : au-dessus d'une certaine valeur, le temps de pose sera trop long et le diffusé, trop important, nuira à la qualité d'image.

Mais il n'est pas possible non plus de radiographier des pièces de plus en plus minces ! En effet, un temps de pose trop court engendrerait une imprécision sur l'exposition. Avec une pièce mince, il est préférable d'utiliser un rayonnement plus mou qui donnera un contraste plus fort.

Si nous raisonnons maintenant pour une pièce d'épaisseur donnée, nous convenons aisément que l'utilisation d'un rayonnement trop dur diminue trop les contrastes, mais l'utilisation d'un rayonnement trop mou cesse d'être bénéfique au-delà d'un certain seuil : un rayonnement de faible énergie diffuse plus dans la pièce, et la qualité d'image gagnée par suite de l'augmentation du contraste est reperdue par l'augmentation du diffusé.

Pour toute pièce, il existe une qualité d'image limite.

Les épaisseurs radiographiables sont données dans le tableau de la page 46.

Energie du rayonnement			Epaisseurs radiographiables (en mm)	
			aluminium	acier
sources γ	tubes à rayons X	50 keV	jusqu'à 12	rayonnement trop mou
		100 keV	3 à 60	jusqu'à 5
		150 keV	10 à 80	3 à 15
		200 keV	20 à 100	10 à 25
	^{192}Ir	400 keV	100 à 200	20 à 100
	^{60}Co	1 MeV	200 à 350	50 à 180
	accélérateurs	2 MeV	300 à 500	100 à 200
	linéaires	8 MeV	500 à 1400	100 à 400
		25 MeV	rayonnement trop dur	100 à 500

IV-Exemples pratiques de prise de clichés.

La plupart des contrôles sont effectués sur des corps creux (tubes, piquages, vannes, récipients, carters...). Les impératifs principaux sont :

a) Placer le film aussi près que possible de la pièce afin de minimiser le flou géométrique.

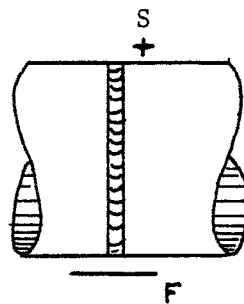
b) Disposer de suffisamment de recul pour la source (même raison qu'en a).

c) Orienter, si possible, le faisceau de rayonnement dans le sens de la plus grande dimension des défauts cherchés.

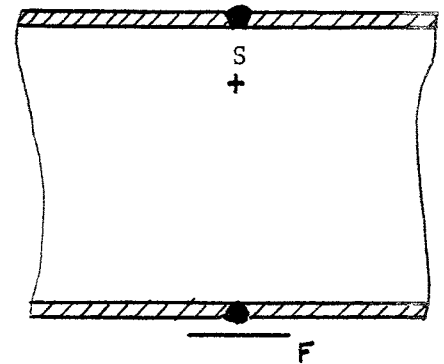
Pour les tubes soudés bout à bout on utilise différentes techniques suivant le diamètre.



1)examen en double
paroi (projection
elliptique)



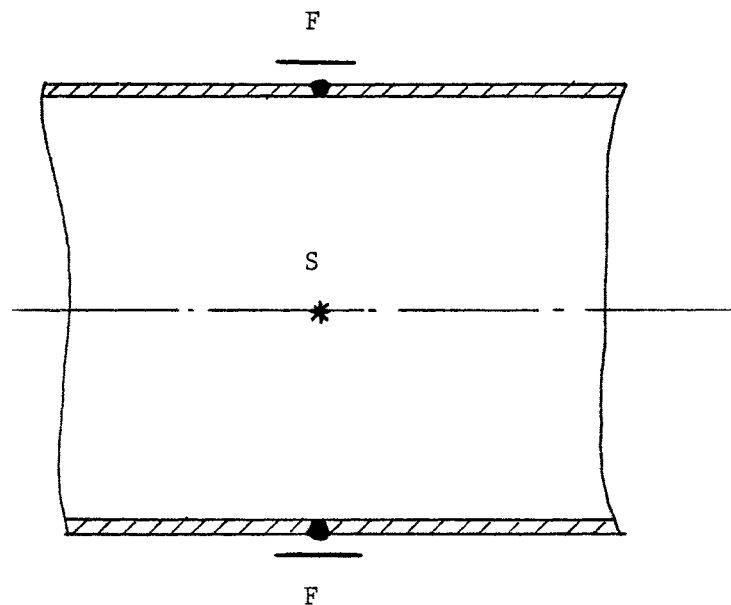
2)examen en double
paroi (source au
contact)



3)examen en simple
paroi (source
excentrée)

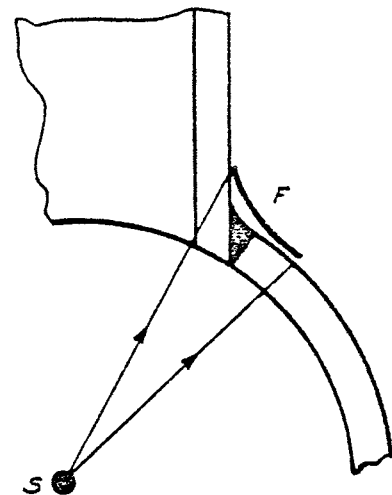
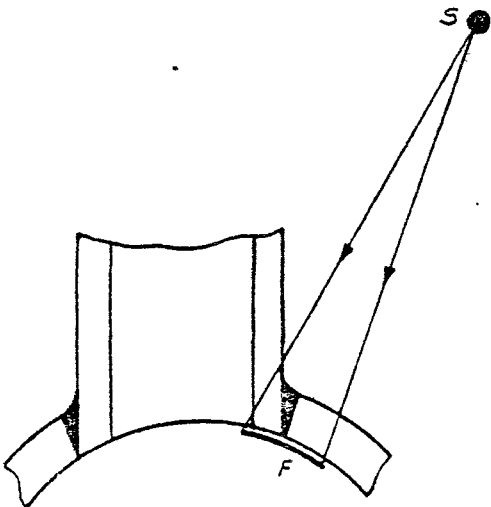
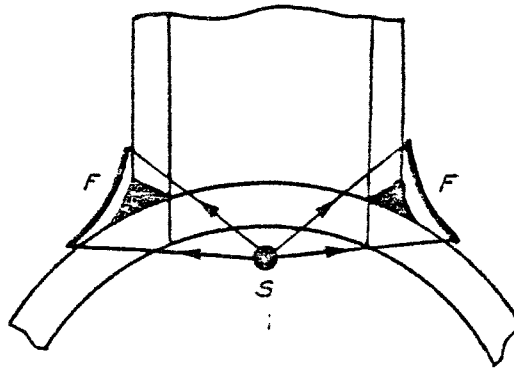
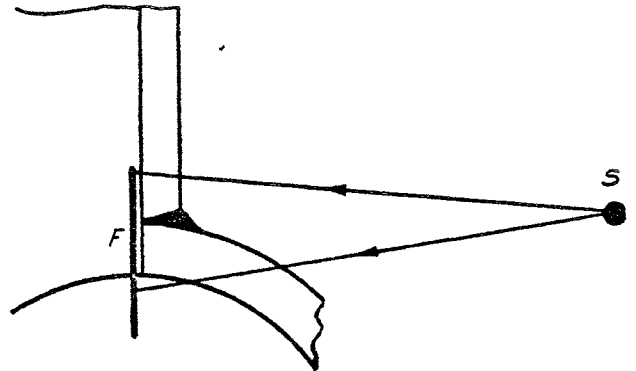
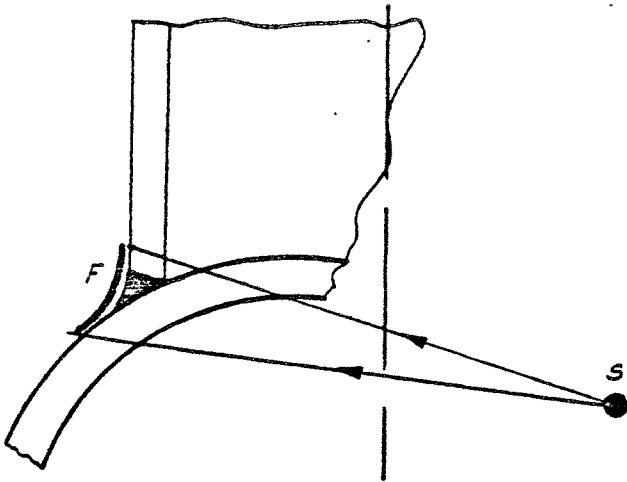
La figure 1) décrit la prise de cliché dans le cas des tubes de petit diamètre. On radiographie ainsi deux quadrants de la soudure : le quart inférieur qui se trouve au contact du film et le quart supérieur. Deux clichés suffisent pour contrôler toute la soudure. Toutefois, dans le cas de tubes dont le diamètre est supérieur à 100mm, le quart supérieur de la soudure n'est pas interprétable car il est trop loin du film et donne un trop fort flou géométrique. Dans ce cas, quatre clichés sont nécessaires pour le contrôle de la soudure.

Les figures 2, 3 et 4 se rapportent à des tubes de plus en plus gros. La position de la source est imposée par le respect du flou géométrique. La disposition la plus avantageuse correspond à la figure 4 puisque toute la soudure est radiographiée entièrement, en une seule exposition. Toutefois, cette technique n'est applicable que lorsque le rayon du tube est assez grand et lorsque l'accès à l'intérieur du récipient est possible.



4) Examen panoramique.

Techniques utilisées pour la radiographie de piquages.



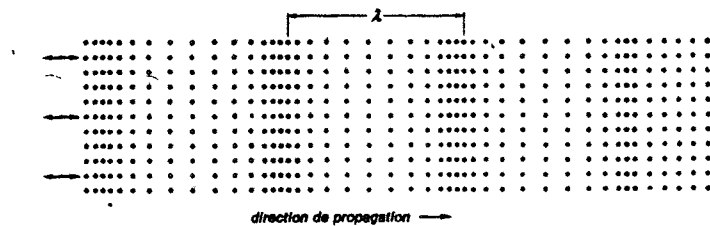
B. CONTROLE PAR ULTRASONS

I - Propagation des ultrasons

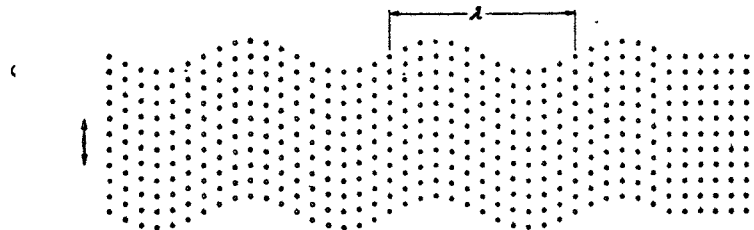
1. Nature des US

Les atomes qui constituent la matière oscillent autour de leur position de repos sous l'effet d'une onde ultrasonore. Il s'agit donc d'une vibration de la matière : il n'y a pas de propagation d'ultrasons dans le vide, bien sûr, mais nous verrons que même dans les gaz, la propagation des ultrasons est très atténuée.

Onde plane de mode longitudinal



Onde plane de mode transversal



Le mode transversal fait intervenir des contraintes de cisaillement : de telles contraintes n'existent ni dans les liquides ordinaires, ni dans le gaz. Ainsi, les ondes transversales ne se propagent que dans les solides et les liquides très visqueux.

Ondes transversales et longitudinales ne se propagent pas avec la même célérité : leurs célérités respectives sont notées C_T et C_L et l'on a approximativement :

$$C_T \approx \frac{1}{2} C_L$$

Toutefois, le rapport $\frac{C_L}{C_T}$ varie d'un matériau à l'autre et dépend du coefficient de Poisson du matériau.

2. Absorption des ultrasons dans un milieu

Lorsqu'une onde se propage dans un milieu, son amplitude décroît le long de son parcours. L'absorption est due à la réaction des atomes voisins.

L'amplitude U décroît suivant une loi exponentielle :

$$U = U_0 e^{-k x}$$

dans laquelle x représente l'abscisse au sein du matériau. Le coefficient d'amortissement k dépend du matériau ainsi que de la fréquence ν de l'onde ultrasonore.

Ce coefficient, faible dans les métaux, est très grand dans les plastiques et dans les gaz.

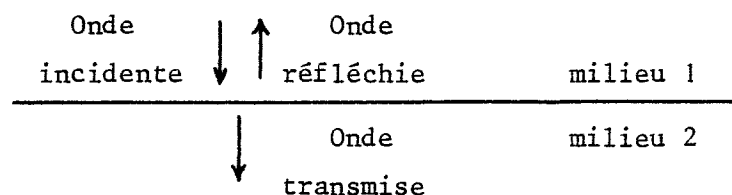
Pour un matériau donné, k est proportionnel à ν^2 . Les hautes fréquences sont donc atténuées plus rapidement que les basses fréquences : c'est l'inverse de ce que l'on observe dans le cas de la propagation des ondes électromagnétiques.

Toute cette énergie perdue est transformée en chaleur. On sait utiliser cette dissipation d'énergie :

- pour le soudage des matières plastiques
- pour le réchauffage des tissus vivants en médecine.

3. Transmission des US entre deux milieux

a/ en incidence normale



Chaque milieu est caractérisé par une impédance caractéristique R donnée par :

$$R = \rho \cdot C$$

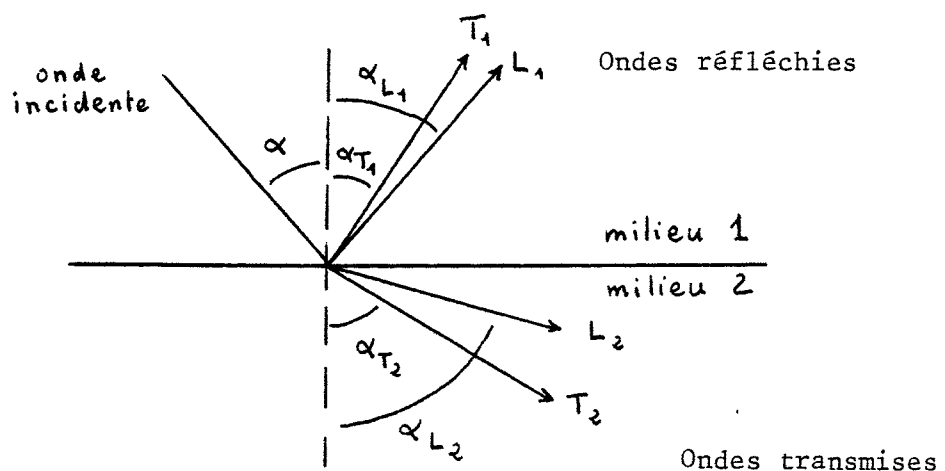
où : ρ masse volumique du matériau au repos
 C célérité des ultrasons dans le matériau

L'amplitude de l'onde réfléchie varie avec l'écart entre les impédances R_1 et R_2 des deux milieux.

Si les deux milieux ont des impédances égales, les ultrasons sont entièrement transmis.

Si le milieu 1 est constitué de matière sous forme solide (métal, matière plastique...) tandis que le milieu 2 est un gaz (air...) la réflexion est totale. Une très mince lame d'air suffit pour renvoyer l'onde totalement.

b/ Incidence oblique



Une onde incidente longitudinale donne donc naissance à deux ondes longitudinales et à deux ondes transversales. On a (loi de Snell) :

$$\frac{\sin \alpha}{C_{L1}} = \frac{\sin \alpha_{L1}}{C_{L1}} = \frac{\sin \alpha_{T1}}{C_{T1}} = \frac{\sin \alpha_{L2}}{C_{L2}} = \frac{\sin \alpha_{T2}}{C_{T2}}$$

et : $\alpha_{L1} = \alpha$

Une onde incidente transversale donnerait des résultats semblables. De la même façon qu'en incidence normale, si le milieu 2 est de l'air, rien n'est transmis.

c/ Notion d'angle limite

Il existe une valeur particulière de α pour laquelle α_{L2}

vaut 90° . Dans ces conditions, une seule onde est transmise dans le milieu 2 : l'onde de mode transversal.

Pour $\alpha_{L_2} = \frac{\pi}{2}$ on trouve

$$\sin \alpha_{\text{lim}} = \frac{C_{L_1}}{C_{L_2}}$$

Cet angle est appelé premier angle limite. Si α est supérieur ou égal à α_{lim} , l'onde T_2 seule pénétrera dans le milieu 2 et nous permettra d'y effectuer un contrôle en incidence oblique.

L'angle α_{T_2} correspondant sera donné par :

$$\sin \alpha_{T_2} = \frac{C_{T_2}}{C_{L_1}} \sin \alpha$$

et puisque $\sin \alpha \geq \sin \alpha_{\text{lim}}$, on aura :

$$\sin \alpha_{T_2} \geq \frac{C_{T_2}}{C_{L_1}} \cdot \frac{C_{L_1}}{C_{L_2}}$$

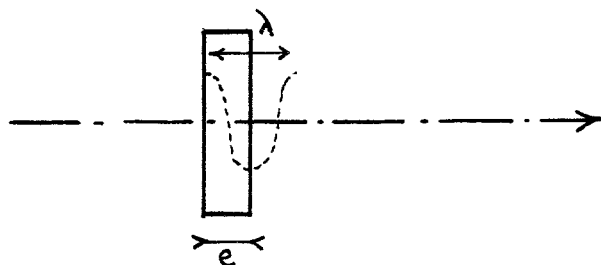
$$\sin \alpha_{T_2} \geq \frac{C_{T_2}}{C_{L_2}}$$

Si le milieu 2 est de l'acier, on trouve :

$$\alpha_{T_2} \geq 33^\circ$$

4. Production des US

L'élément essentiel est la pastille piézoélectrique ou transducteur. Soumise à une tension électrique d'excitation très brève (quelques μs), la pastille cylindrique entre en résonance. Les dimensions de la pastille sont liées à la valeur de la longueur d'onde des ultrasons produits.



pastille cylindrique de
diamètre D et d'épaisseur e

$$e = \frac{\lambda}{2}$$

Ces pastilles sont, le plus souvent, des céramiques polycristallines de titanate de baryum ou de titanate-zirconate de plomb.

Ces pastilles sont montées dans un palpeur.

Schéma d'un palpeur droit

Il émet des ondes longitudinale perpendiculairement à sa plaque-couvercle.

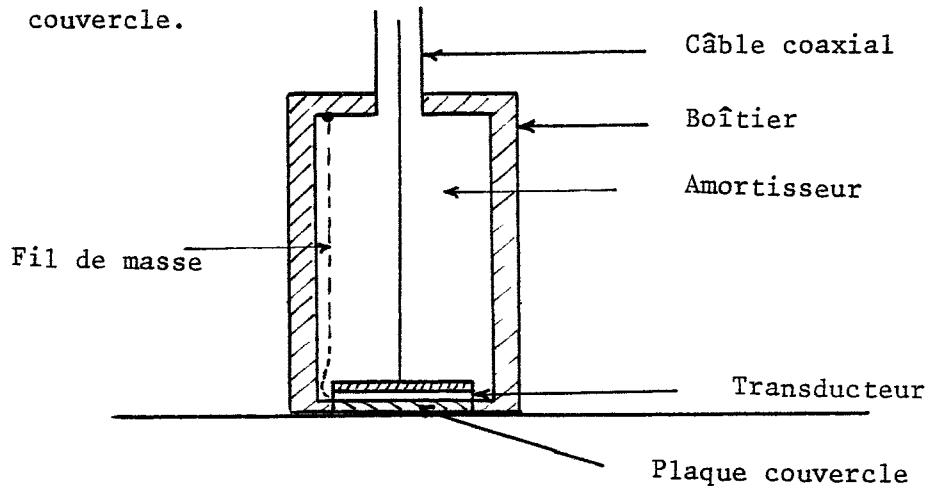
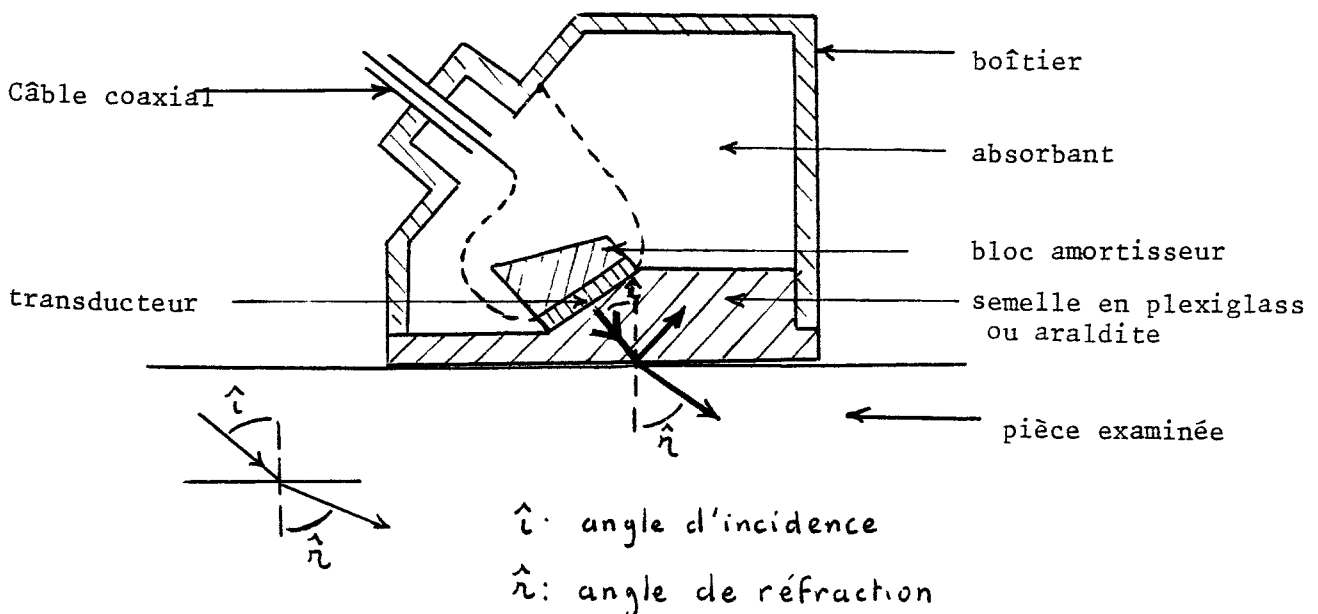


Schéma d'un palpeur oblique (ou palpeur d'angle)

L'onde longitudinale, émise dans la semelle, donne dans la pièce, une onde transversale. L'onde longitudinale transmise est éliminée (notion de premier angle limite).



Remarque 1 : Les ondes ultrasonores ne sont pas produites en continu mais sous forme de trains d'ondes.



Remarque 2 : Nous avons vu que la transmission des ultrasons était arrêtée par une mince lame d'air. Entre la semelle du palpeur et la pièce on interpose donc un milieu visqueux (huile, graisse, colle à papier dissoute dans l'eau...).

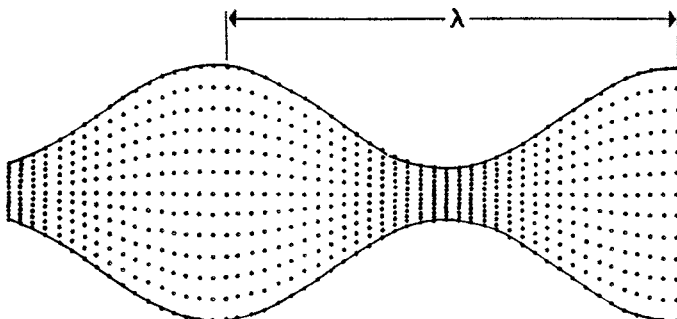
Tout au long de l'examen ultrasonique, l'opérateur devra s'assurer que les caractéristiques de ce milieu se conservent. Le milieu de couplage influe en effet sur les résultats du contrôle.

Remarquons que les résidus d'huile introduisent une gêne pour les opérations qui doivent être exécutées ensuite sur la pièce (manutention, contrôle radiologique,...).

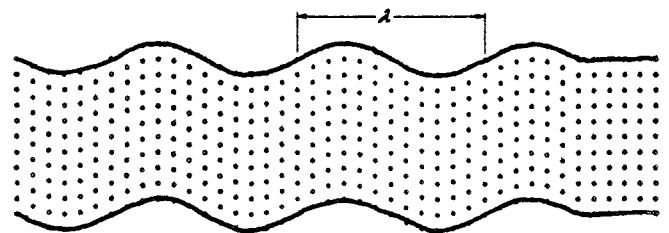
Remarque 3 : La transmission d'ondes transversales pures n'est pas possible dans les pièces minces. Pour une fréquence ultrasonore ν (en MHz) et une plaque d'épaisseur e (en mm):

Si $\nu e < 10$ ce sont en fait des ondes de plaque qui prennent naissance.

Il faut $\nu e > 20$ pour que le contrôle soit possible.



onde de plaque symétrique

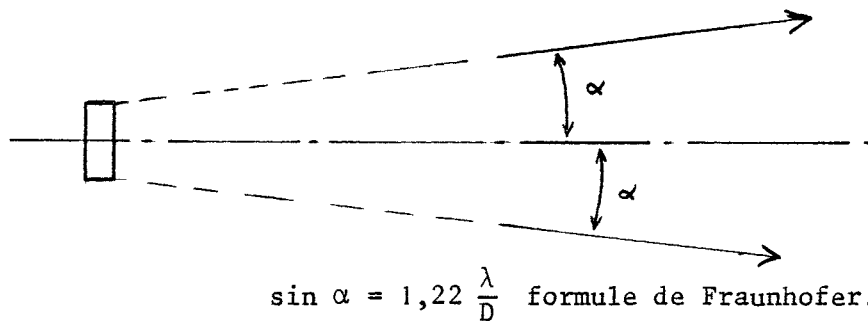


onde de plaque asymétrique

Dans la pratique, un contrôle sur des pièces d'épaisseur inférieure à 10 mm pose de gros problèmes.

5. Caractéristiques des palpeurs courants

- . Fréquence : 0,5 ; 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 10 ; 15 ; 25 MHz.
- . Angle de réfraction dans l'acier : 0° ; 35° ; 45° ; 60° ; 70° ; 80°.
- . Une autre caractéristique importante est la valeur du demi-angle au sommet du cône de divergence.



Zone proche ou zone turbulente de Fresnel

La région proche de l'émetteur est très perturbée sur une distance valant, en gros :

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}$$

Exemple : $D = 10 \text{ mm}$ $\lambda = 1,16 \text{ mm}$ (pour 5 MHz dans l'acier)
 $N = 25 \text{ mm}$

Application : On trouve (à côté des palpeurs normaux) des palpeurs dits miniatures qui se caractérisent par un rapport $\frac{\lambda}{D}$ fort

→ fort angle de divergence

→ faible zone proche

MASSSES VOLUMIQUES, CELERITES LONGITUDINALES ET TRANSVERSALES, IMPEDANCES
ACOUSTIQUES MOYENNES DE MATERIAUX D'APRES DIFFERENTS AUTEURS

Milieu	Température en °C	Masses volumiques en 10^3 kg/m^3	Célérité C_L en m/s	Célérité C_T en m/s	Impédance acoustique ρC_L $10^6 \text{ kg/m}^2/\text{s}$
Acier		7,8	5 880	3 230	45,9
Air	0	$1,293 \cdot 10^{-3}$	331		$0,43 \cdot 10^{-3}$
Alcool éthylique	20	0,789	1 170		0,92
Aluminium		2,7	6 300	3 080	17
Araldite		1,20	2 500	1 070	3
Argent		10,50	3 600	1 590	38
Baryum (titanate)	20	5,5	5 500		30,2
Cadmium		8,02	2 780	1 500	22,8
Caoutchouc		0,91	1 479		2,09
Caoutchouc artificiel dur		1,2	2 300		2,8
Cuivre		8,93	4 600	2 260	41
Eau de mer	17	1,025	1 510		1,55
Eau douce	20	0,999	1 483		1,43
Etain		7,2	3 320	1 670	23,9
Fer		7,87	5 850		46
Fonte grise		7,2	4 600	2 160	
Glace		0,91	3 980	1 990	3,62
Glycérine	20	1,260	1 920		2,42
Huile		0,80	1 500		1,2
Laiton 70/30		8,1	4 430	2 125	
Magnésium		1,7	5 800	3 080	9,1
Manganèse		7,3	4 660	2 350	34
Mercure	20	13,55	1 450		19,7
Molybdène		10,2	6 250	3 350	63,7
Nickel		8,90	5 600	2 960	50
Nylon		1,1	1 860		2,05
Or		19,32	3 240	1 200	63
Petrole (Kerdane)		0,8	1 320		1,06
Platine		21,50	3 960	1 670	85
Plexiglas	20	1,2	2 680	1 250	3,2
Plomb		11,4	2 160	700	24,6
Acier inoxydable 18/10		7,9	5 650	3 060	45
Sulfate de Lithium		2,06	4 720		9,7

Milieu	Température en °C	Masses volumiques en 10^3 kg/m^3	Célérité C_L en m/s	Célérité C_T en m/s	Impédance acoustique ρC_L $10^6 \text{ kg/m}^2/\text{s}$
Polyéthylène	20	0,94	2 340	925	2,1
Polystyrène	20	1,06	2 350	1 120	2,5
Porcelaine			5 450	3 350	
Quartz	20	2,65	5 720	3 515	15,2
Stumatite	20	2,5	5 000		12,5
Titane		4,5	5 990	3 120	27
Tungstène		19,3	5 460	2 620	83
Tungstène (carbure de)		11,0	6 650	3 980	73,1
Uranium		18,7	3 370	2 020	63
Zinc		7,1	4 170	2 410	29,6
Zirconium		6,51	4 650	2 300	30,3

Nota : Les valeurs des vitesses acoustiques dépendent de l'état du matériau (brut de fusion - laminé - recuit - trempé etc...), de son degré de pureté, de sa composition chimique (cas des alliages) et de sa température. Il est donc normal que des valeurs légèrement différentes puissent apparaître selon les auteurs, mais les divergences sont généralement faibles et il n'en résulte aucun inconvénient pour les besoins courants.

Il s'agit d'ailleurs, en général, de valeurs moyennes, notamment dans le cas des fontes. Dans le cas des aciers ordinaires le module d'élasticité longitudinale E peut varier de $185\,000 \text{ N/mm}^2$ à $210\,000 \text{ N/mm}^2$, selon la teneur en carbone, alors que le coefficient de Poisson et la masse volumique demeurent à peu près constants. Dans ces conditions la célérité longitudinale peut elle-même varier entre 5570 m/s et 5940 m/s avec une valeur de 5380 m/s pour l'acier doux. L'emploi d'aciers doux étant le plus fréquent c'est la célérité de cet acier que nous avons fait figurer dans le tableau ci-dessus.

LONGUEUR D'ONDE - EN MM DES ONDES LONGITUDINALES

	1 MHz	2 MHz	3 MHz	5 MHz
Acier	5,85	2,9275	1,95	1,162
Air	0,331	0,1655	0,110	0,066
Aluminium	6,22	3,11	2,073	1,244
Argent	3,6	1,8	1,2	0,72
Cadmium	2,78	1,38	0,926	0,556
Caoutchouc	1,479	0,7395	0,493	0,2958
Caoutchouc artificiel	2,3	1,15	0,766	0,46
Cuivre	4,7	2,35	1,566	0,94
Eau	1,4831	0,74155	0,49436	0,286
Etain	3,32	1,66	1,106	0,664
Fonte grise	4,6	2,3	1,533	0,92
Glace	3,98	1,99	1,326	0,796
Glycérine	1,923	0,4615	0,641	0,3846
Huile	1,25	0,675	0,416	0,250
Huile de transformateur	1,39	0,695	0,463	0,278
Laiton	4,43	2,215	1,476	0,886
Magnésium	4,8	2,4	1,6	0,96
Manganèse	4,66	2,33	1,553	0,932
Nickel	5,43	2,815	1,876	1,126
Or	3,24	1,62	1,08	0,648
Platine	3,96	1,98	1,32	0,792
Plomb	2,16	1,00	0,72	0,432
Quartz	5,57	2,785	1,856	1,114
Tantal	3,35	1,675	1,116	0,670
Titanate de baryum	6,05	3,025	2,016	1,230
Plexiglass	2,7	1,35	0,9	0,54
Zinc	4,17	2,085	1,39	0,834

II - Principe des contrôles par ultrasons

1. Méthode par écho - présentation de type A

La méthode la plus utilisée est dite "méthode par écho". Sa mise en oeuvre la plus courante est appelée "présentation de type A".

Très souvent, on utilise un seul palpeur qui fonctionne tantôt en émetteur et tantôt en récepteur pour recevoir les échos.

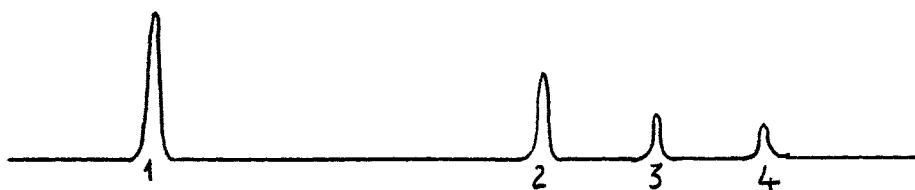
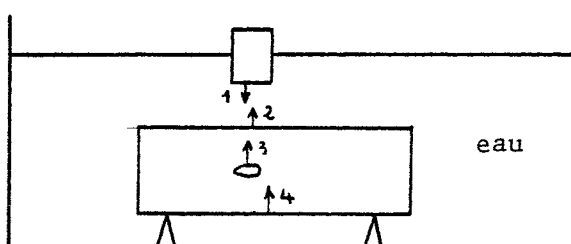
Le temps mis par l'écho pour faire le trajet aller-retour est proportionnel à la profondeur à laquelle se situe le défaut. La position du défaut est donc connue avec précision. (Voir figure page 61)

2. Méthode par écho - Autres présentations

On observe, de nos jours, un développement des contrôles automatiques (au moins pour les pièces de géométrie simple).

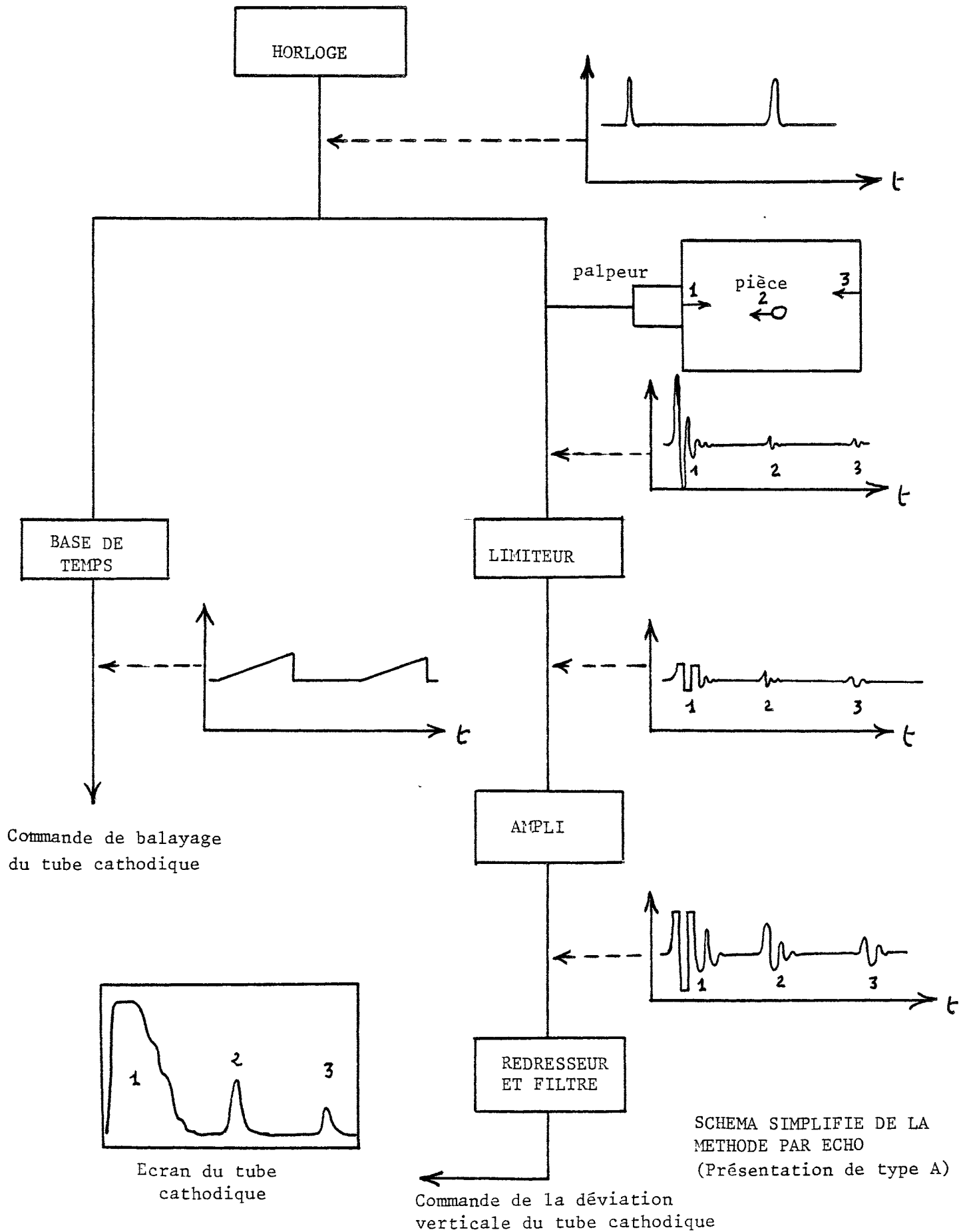
Le contrôle automatique aux ultrasons peut être facilité par une technique dite "par immersion".

Pièce et palpeur sont immergés sans être en contact.



1. Signal d'émission
2. Echo d'entrée
3. Echo de défaut
4. Echo de fond

La célérité des ondes dans l'eau est environ 4 fois plus faible que dans l'acier et le décalage entre 1 et 2 est grand.



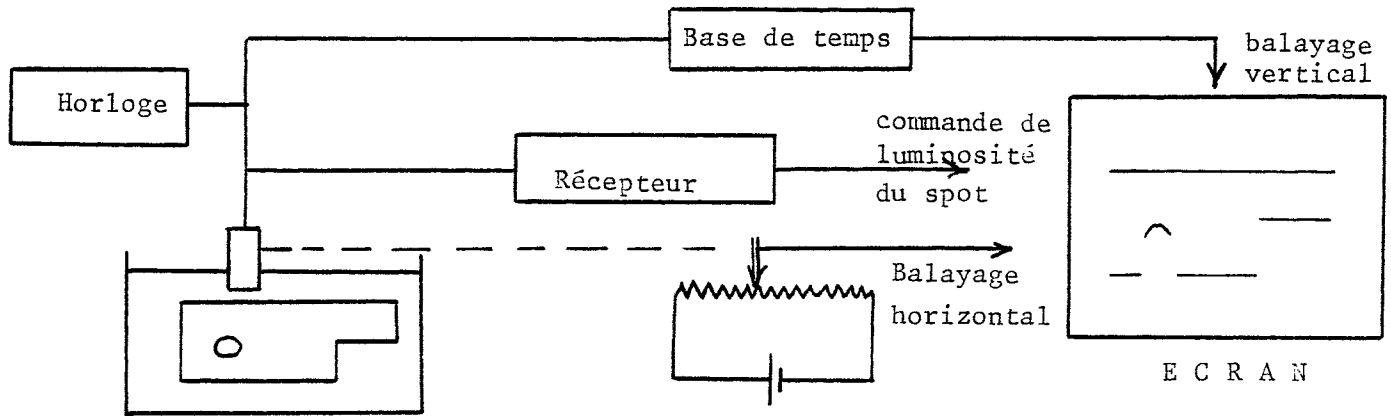
Les avantages sont :

- examen d'objets rugueux sans usure du palpeur
- examen à grande vitesse en conservant un couplage constant.

Par contre :

- l'équipement est plus complexe
- Seules les pièces de petites dimensions conviennent
- l'eau et l'acier ayant des impédances acoustiques très différentes une forte proportion de l'énergie est réfléchiée à l'entrée dans la pièce.

Il est néanmoins possible d'assurer une exploration automatique de la pièce. Nous citerons en exemple la présentation de type B.



Echographie de type B

- la base de temps commande cette fois la balayage vertical
- le palpeur est mobile suivant une droite et commande le balayage horizontal
- les échos modulent la luminosité du spot.

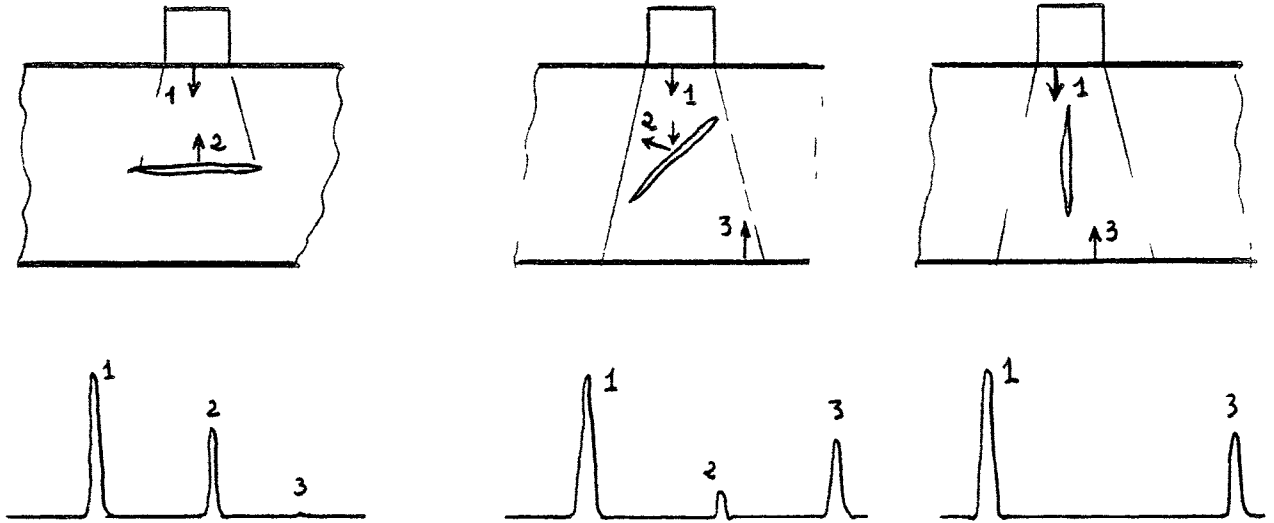
III - Limites de la méthode

1. Taille et orientation des défauts

a/ Défauts plans

Ce sont des défauts qui aux US donnent des échos intenses.
Si le plan du défaut est perpendiculaire au faisceau, la détection est

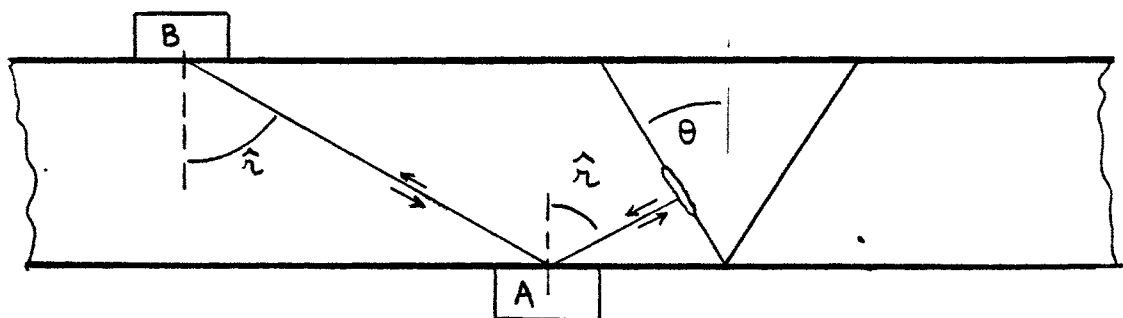
facile. Sinon, elle est difficile, voire même impossible.



Attention, les défauts plans étant toujours déformés, voilés, la réponse n'est pas toujours liée à la surface du défaut ou à l'angle du défaut par rapport au faisceau.

La profondeur du défaut dans la pièce est bien déterminée, mais pas son épaisseur.

La détection des défauts plans est nette mais il importe de choisir plusieurs angles de réfraction dans le matériau.

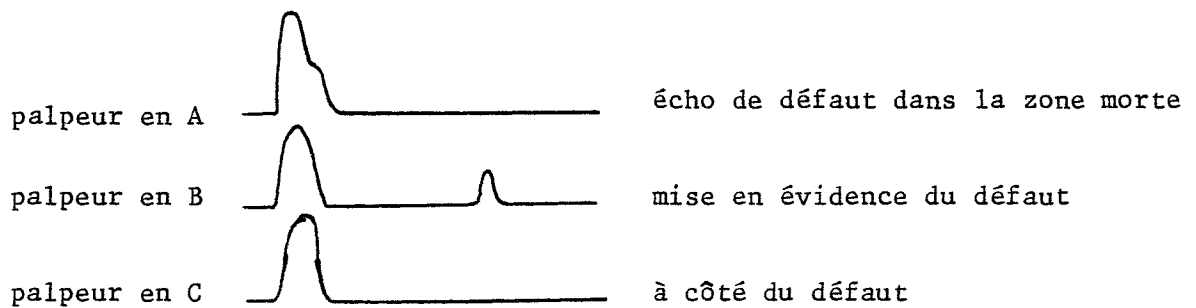
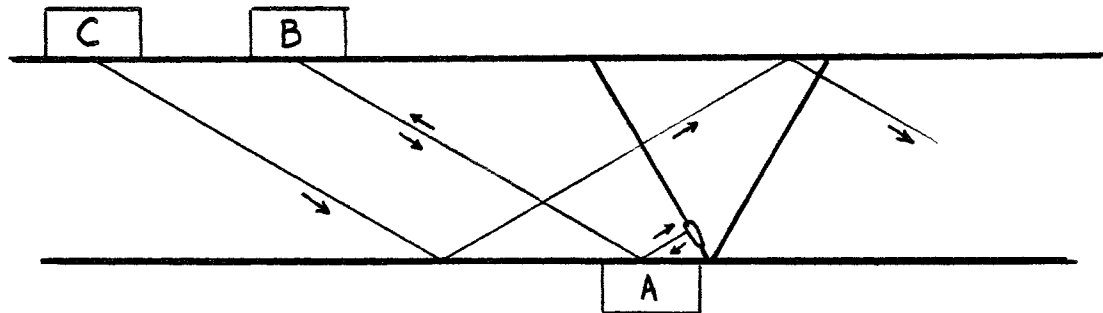


Exemple de recherche d'un collage dans une soudure en V

On choisit un angle \hat{r} lié à l'angle θ du chanfrein

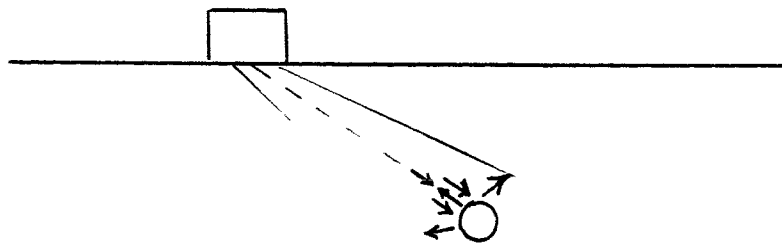
La recherche avec le palpeur en A risque d'être rendue difficile par l'influence des perturbations de la zone proche. L'écho peut

même être caché par le signal d'émission (zone morte de l'ordre de quelques mm),

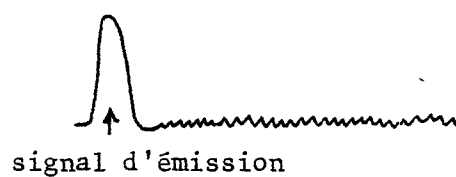


b/ Défauts volumiques

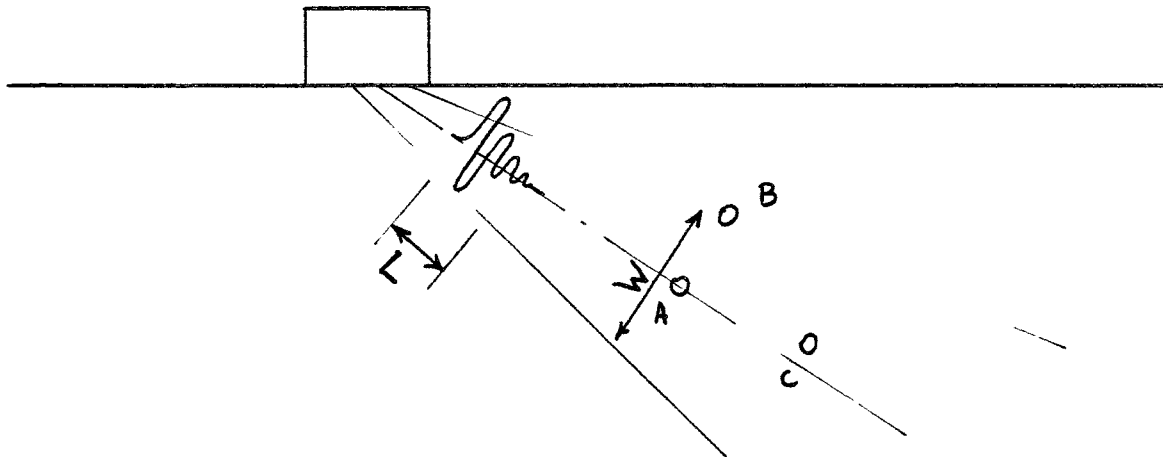
- Donnent un écho faible s'ils sont de petite taille.
- L'angle d'incidence importe peu.



Il faut bien songer qu'à la limite, on ne peut pas détecter les soufflures. Une multitude de petites inclusions va donner un fond continu nommé "fine herbe".



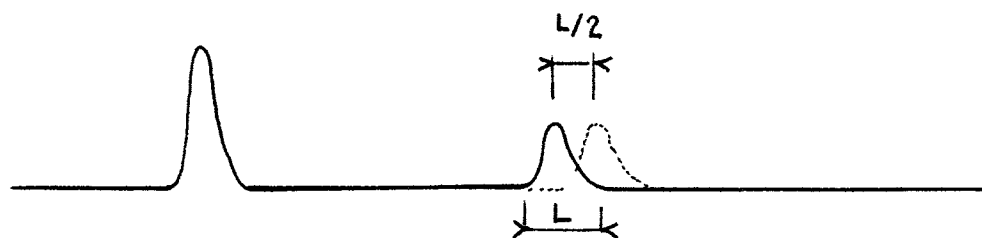
c/ Résolution des contrôles US



L et W représentent respectivement la longueur et la largeur du train d'ondes au niveau de la zone défectueuse.

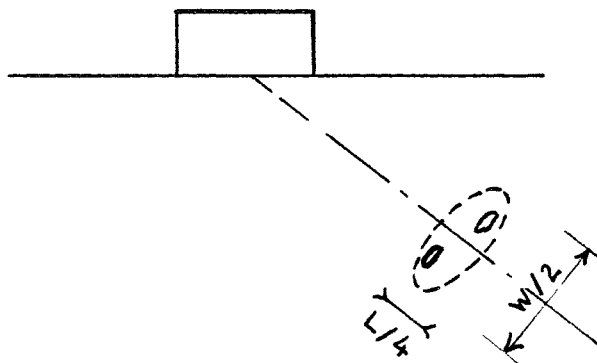
A et B seront distincts s'ils sont distants de $W/2$, ce qui peut être énorme si le faisceau est large. Un faisceau large correspond à un palpeur ayant une forte divergence ou à un défaut situé à une grande profondeur. Il est toujours utile, lorsqu'un défaut a été repéré à une profondeur donnée, d'affiner le contrôle en choisissant un nouveau palpeur présentant un faisceau étroit dans la zone intéressante. On peut ainsi arriver à des valeurs de $W/2$ de l'ordre de quelques mm.

A et C seront distincts pourvu que, sur l'écran du tube cathodique, les échos soient séparés par $L/2$.



Ceci sera vérifié si A et C sont séparés, dans la pièce, par une longueur $L/4$. Une valeur typique de résolution est 3 mm mais avec des palpeurs très amortis on peut descendre plus bas.

Au total, deux défauts seront considérés comme un défaut unique s'ils sont contenus dans un ellipsoïde défini par la figure suivante:



Remarque : Si le défaut qui se trouve devant est un défaut plan, il empêche la mise en évidence des défauts situés derrière lui. Il faut attaquer la pièce par l'autre face, ou avec une incidence différente.

2. Influence du matériau examiné

Avec le laiton, les aciers austénitiques et l'inconel, de gros problèmes apparaissent : l'atténuation est forte et les échos en retour sont difficilement lisibles. La taille des grains importante provoque une dispersion du faisceau lorsque la taille des grains devient comparable à $\lambda/2$. On est alors contraint d'augmenter λ c'est-à-dire de travailler à des fréquences très faibles.

Cette diminution de fréquence s'accompagne d'une augmentation de la divergence du faisceau. Valeur de l'angle α pour trois palpeurs de fréquences différentes. (dans l'acier):

$\nu = 10 \text{ MHz}$	$\alpha = 4^\circ$
$\nu = 2 \text{ MHz}$	$\alpha = 10^\circ$
$\nu = 0,5 \text{ MHz}$	$\alpha = 28^\circ$

Dans le cas des contrôles de soudures dans l'acier inoxydable austénitique, le phénomène de dispersion du faisceau ultrasonore est encore accru par l'anisotropie au niveau de chaque grain.

3. Géométrie de la pièce

a/ Pièces minces

Pour des épaisseurs inférieures à 10 mm, il devient impossible de contrôler la pièce avec des palpeurs obliques. Il est possible

d'effectuer des contrôles en ondes de plaque mais la précision n'est pas bonne.

Le contrôle des pièces minces avec un palpeur droit est délicat : les défauts se trouvent à coup sûr dans la zone morte du palpeur. Ceci veut dire que l'écho de défaut revient, alors que les dernière vibrations du signal d'émission sont à peine amorties.

Une solution consiste à utiliser un palpeur double-combiné dans lequel pastille émettrice et pastille réceptrice sont juxtaposées. Le récepteur, qui n'est pas relié à l'émetteur, n'est donc jamais aveuglé et permet de détecter des défauts très proches de la surface (2 mm).

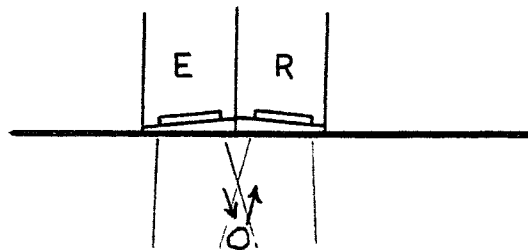
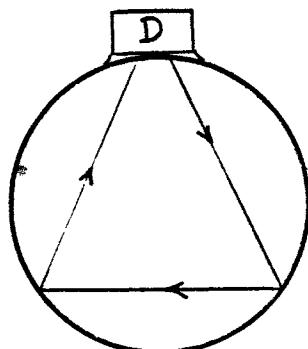
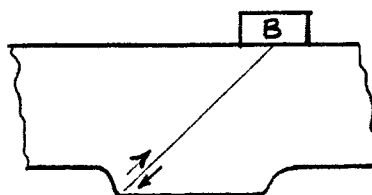
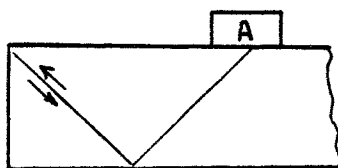


Schéma d'un palpeur double-combiné

b. Effets de bords

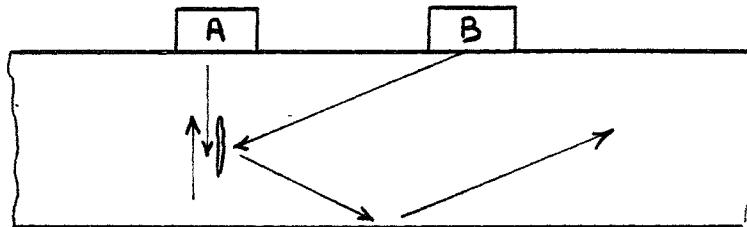
Les pièces de formes complexes donnent naissance à de nombreux échos parasites.



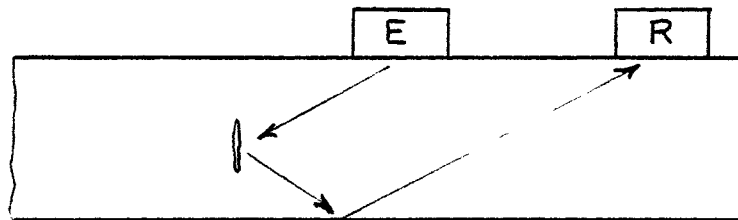
Le contrôle des pièces cylindriques est délicat : le coin d'huile joue le rôle de prisme et augmente la divergence du faisceau ultrasonore ce qui peut être à l'origine d'échos parasites.

c. Recherche des fissures perpendiculaires à la grande face d'une pièce

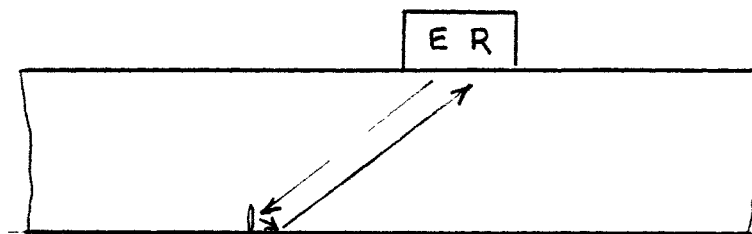
Une fissure située dans un plan perpendiculaire à une tôle est difficilement détectable en ce sens que palpeurs droits et palpeurs d'angles ne permettent pas d'obtenir d'écho.



On utilisera dans ce cas une méthode dite "tandem" avec un palpeur émetteur et un palpeur récepteur.



La recherche des fissures proches de la surface est plus aisée.



d. Etat de surface

Les pièces brutes de laminage, de forge ou de fonderie se prêtent mal au contrôle. La calamine, les oxydes peu adhérents, le mauvais état de surface gênent le contact et usent la semelle des palpeurs.

En fonderie, où le mauvais état de surface se combine généralement avec des formes complexes, les contrôles ultrasonores sont délicats et peu répandus.

C - COMPARAISON DE LA RADIOLOGIE ET DES U.S.

	Radiologie	Ultrasons
Interruption du travail sur la pièce contrôlée	longue ; le transfert de la pièce dans une enceinte spéciale peut demander jusqu'à 8h	courte
Détection des défauts volumiques	bonne	mauvaise à très mauvaise
Détection des défauts plans	médiocre	bonne
Obtention de documents permanents	oui	non
Reconnaissance des défauts (nature et dimensions)	aisée	très difficile à impossible
Localisation des défauts dans la pièce	imparfaite	complète
Evaluation de la finesse et de la fiabilité du contrôle	aisée, à l'aide des I.Q.I. (indicateurs de qualité d'image)	on est forcé de faire confiance à l'opérateur
Adaptation à tous les matériaux	oui	ne convient pas pour le laiton l'inconel, les aciers austénitiques.
Contrôle des pièces aux formes complexes	possible avec des précautions	difficile
Contrôle des pièces présentant un mauvais état de surface	possible	difficile
Contrôle des pièces épaisses	limite absolue vers 500mm. Des difficultés à partir de 200mm	aisé
Contrôle des pièces minces	aisé	très grosses difficultés en dessous de 10mm. Des difficultés entre 10 et 20mm
Investissement	élevé à très élevé	faible

SPECIFICATIONS DE CONTROLE

I - NECESSITE D'UNE SPECIFICATION DE CONTROLE

En fabrication, la perfection coûte très cher. La recherche de la perfection n'est valable que dans certains cas, notamment lorsque la rupture entraînerait un risque élevé ou un coût de réparation prohibitif.

Notion de qualité d'une pièce : qualité Q_1 , qualité Q_2 , etc..

La qualité est déterminée par :

- les sollicitations en service
- les risques encourus en cas de rupture.

La qualité Q_1 correspond aux sollicitations les plus fortes et aux risques les plus grands. Le contrôle sera donc le plus complet, le plus sévère.

Mais il en va du contrôle comme de la fabrication. La perfection coûte très cher. Ainsi, un contrôle radiographique rapide d'une petite vanne de 2 pouces, en acier moulé, ne demandera que quelques minutes de travail. Par contre, une pièce de mêmes dimensions, destinée à une centrale nucléaire et de qualité Q_1 , sera radiographiée en 16 heures.

Notion de classe de contrôle : classe 1, classe 2, classe 3, etc...

On dit aussi "niveau de sévérité".

La classe détermine :

- la finesse du contrôle
- la taille et le nombre de défauts que l'on acceptera.

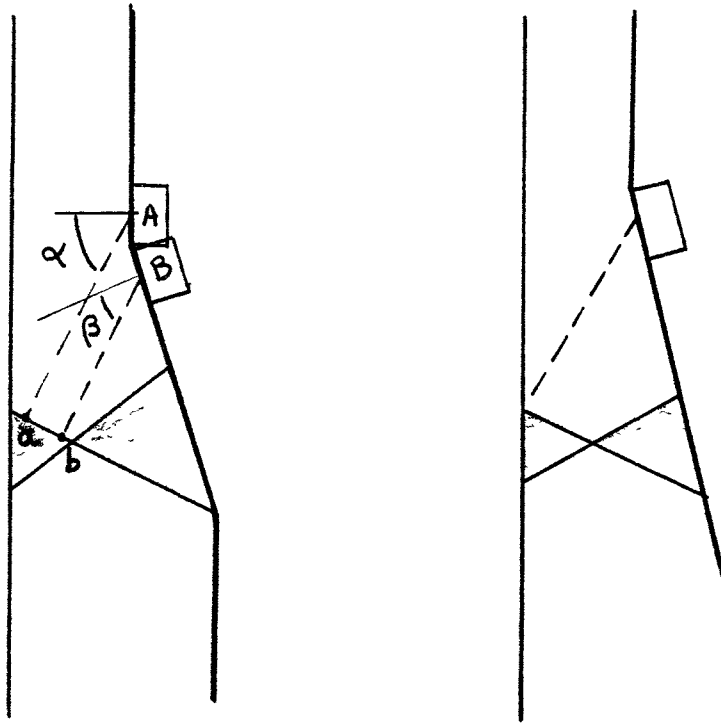
La sévérité du contrôle augmente directement le prix de la pièce et son délai de fabrication. De plus, en imposant de "réparer" certains défauts, on introduit le risque supplémentaire de créer des défauts plus graves que ceux que l'on cherchait à éliminer.

Dans les pièces soudées comme dans les pièces moulées, les réparations s'effectuent en creusant la zone défectueuse et en rechargeant à l'arc électrique. Le risque d'introduire des fissures est donc grand, en cas de mauvais préchauffage ou post-chauffage de la région réparée.

Bien entendu, un nouveau contrôle est effectué après réparation.

L'efficacité d'un C.N.D. dépend donc :

- de la collaboration entre fabricant et acheteur : définition de la qualité de la pièce, de la classe du contrôle, discussion pour l'acceptation des défauts "limites".
- de la conception de la pièce : choix du matériau, choix de la forme de pièce permettant le contrôle le plus aisé, donc le plus sûr.



Exemple : contrôle aux ultrasons d'une soudure présentant une variation d'épaisseur. Le profil de gauche rend difficile le contrôle d'une partie du cordon. Le profil de droite, plus progressif, permet un contrôle plus complet.

II - CONTROLE DES SOUDURES ET INTERPRETATION DES RESULTATS

1. Le contrôle proprement dit

Les spécifications fixent les techniques à mettre en oeuvre :

* En radiologie, les spécifications imposent :

- le type de source, ou de tube (énergie de rayonnement)
- le type de film (la rapidité du film, c'est-à-dire la taille des grains)

- l'épaisseur des écrans renforceurs au plomb
- l'épaisseur du filtre
- l'épaisseur du blocage
- la qualité d'image (type d'IQI et diamètre du plus petit trou vu)
- le repérage de la pièce, qui doit apparaître sur le film pour permettre de situer les défauts dans la pièce)
- la valeur du flou géométrique
- la technique de développement des films
- la densité du radiogramme
- le nombre de clichés minimum permettant de s'assurer de la qualité de la pièce contrôlée.

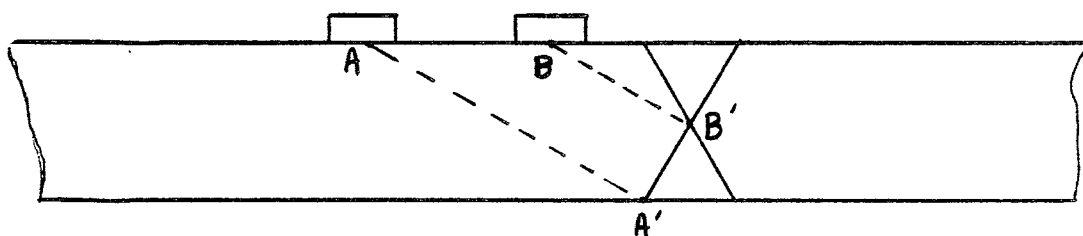
Pour illustrer ce dernier point, on se reportera par exemple aux pages 47 et 48, où sont décrites les modalités du contrôle de la soudure bout à bout de deux tubes. Pour des tubes de diamètres croissants, les techniques de prise de clichés sont :

- 1 - projection elliptique, 2 prises de cliché à 90°
- 2 - projection elliptique, 4 prises de clichés à 90°
- 3 - source à l'extérieur, au contact, 4 prises de clichés
- 4 - source à l'intérieur, excentrée, 4 prises de clichés
- 5 - panoramique, une seule prise de cliché.

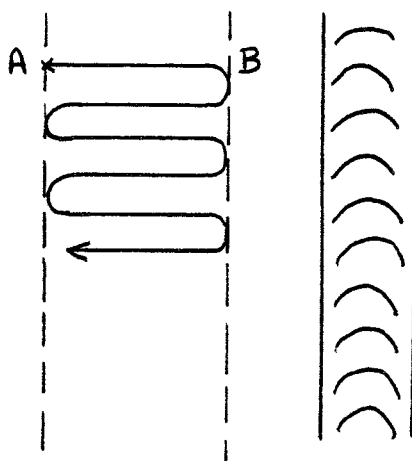
* En ultrasons, les spécifications imposent :

- le type de générateur d'ultrasons
- les caractéristiques (défaut de linéarité)
- la fréquence du palpeur
- le type de palpeur
- le milieu de couplage palpeur-pièce
- l'état de surface de la pièce
- l'étalonnage des palpeurs (angle de réfraction, point d'émergence)
- le réglage du générateur (puissance d'émission et amplification de la réception) sur des défauts types ou sur des cales étalons
- les modalités d'exploration permettant de contrôler la pièce au mieux.

Pour illustrer ce dernier point, on prendra l'exemple d'une soudure plane avec chanfrein en X.



En déplaçant le palpeur entre les points A et B, on contrôlera une partie du cordon, et on mettra clairement en évidence les défauts plans, parallèles à la direction A'B'.



Soudure plane (vue de dessus)

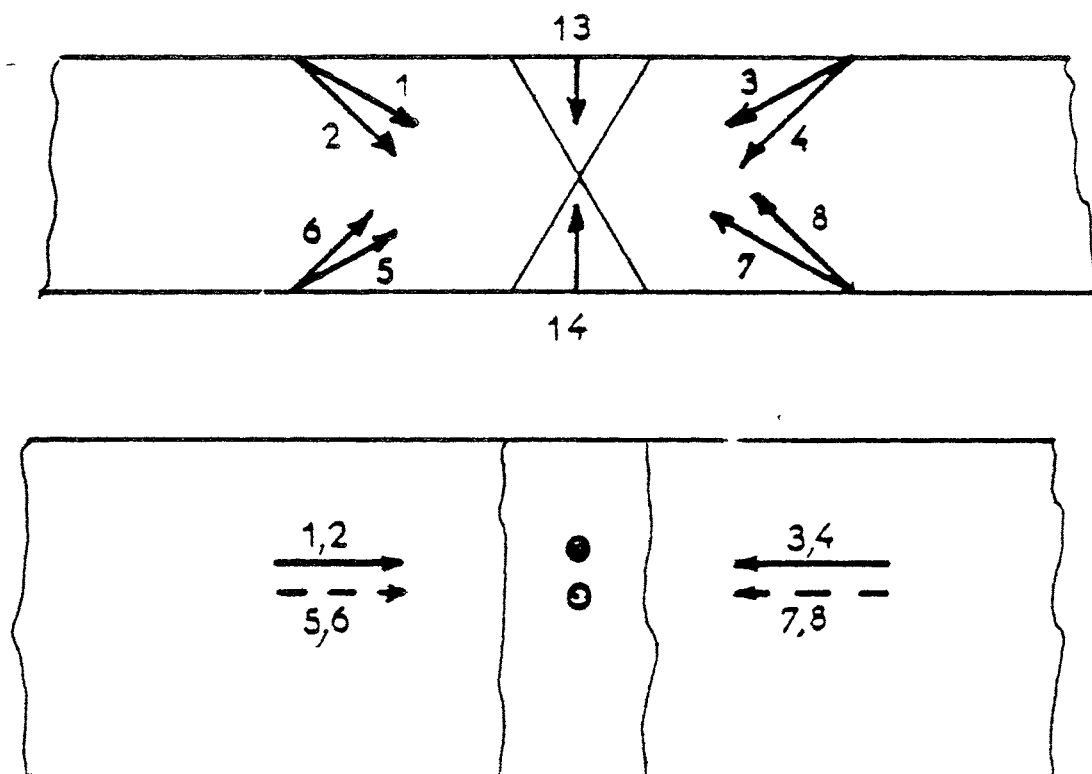
La vue de dessus de la soudure nous montre qu'un mouvement de lacet permettra d'explorer toute la longueur du cordon.

La figure de la page suivante, tirée du RCC-M, (spécifications de l'EDF dans le domaine de la construction mécanique pour les centrales nucléaires) précise les 14 explorations nécessaires au contrôle d'une soudure de classe 1 avec chanfrein en X. Les quatre côtés de la soudure doivent être explorés par un mouvement de lacet en utilisant successivement deux palpeurs ayant des angles de réfractions différents.

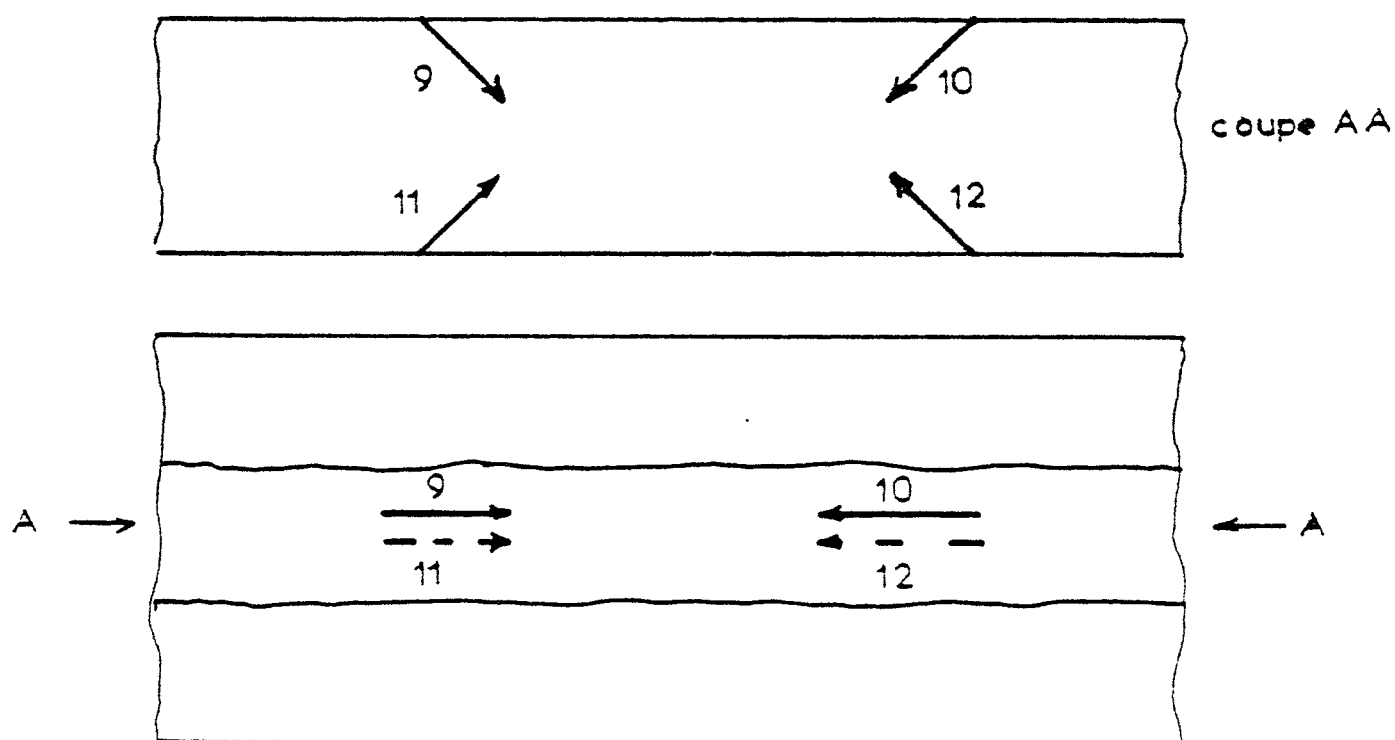
Pour une soudure en classe 2 ou 3, on supprimerait les explorations 2, 4, 6 et 8, c'est-à-dire le deuxième angle de réfraction.

RCC-M

Règles de conception et de construction applicables aux matériels mécaniques



Recherche des défauts longitudinaux



2. Interprétation des résultats

Le travail ne s'achève pas avec la partie technique du contrôle : l'interprétation du contrôle et la discussion sont des étapes fondamentales. Les défauts sont souvent à la limite de l'acceptation.

L'interprétation se déroule en quatre temps :

- a/ acceptation de la technique de contrôle
- b/ caractérisation des défauts observés
- c/ acceptation des défauts observés
- d/ rédaction d'un procès-verbal.

a/ Acceptation de la technique de contrôle

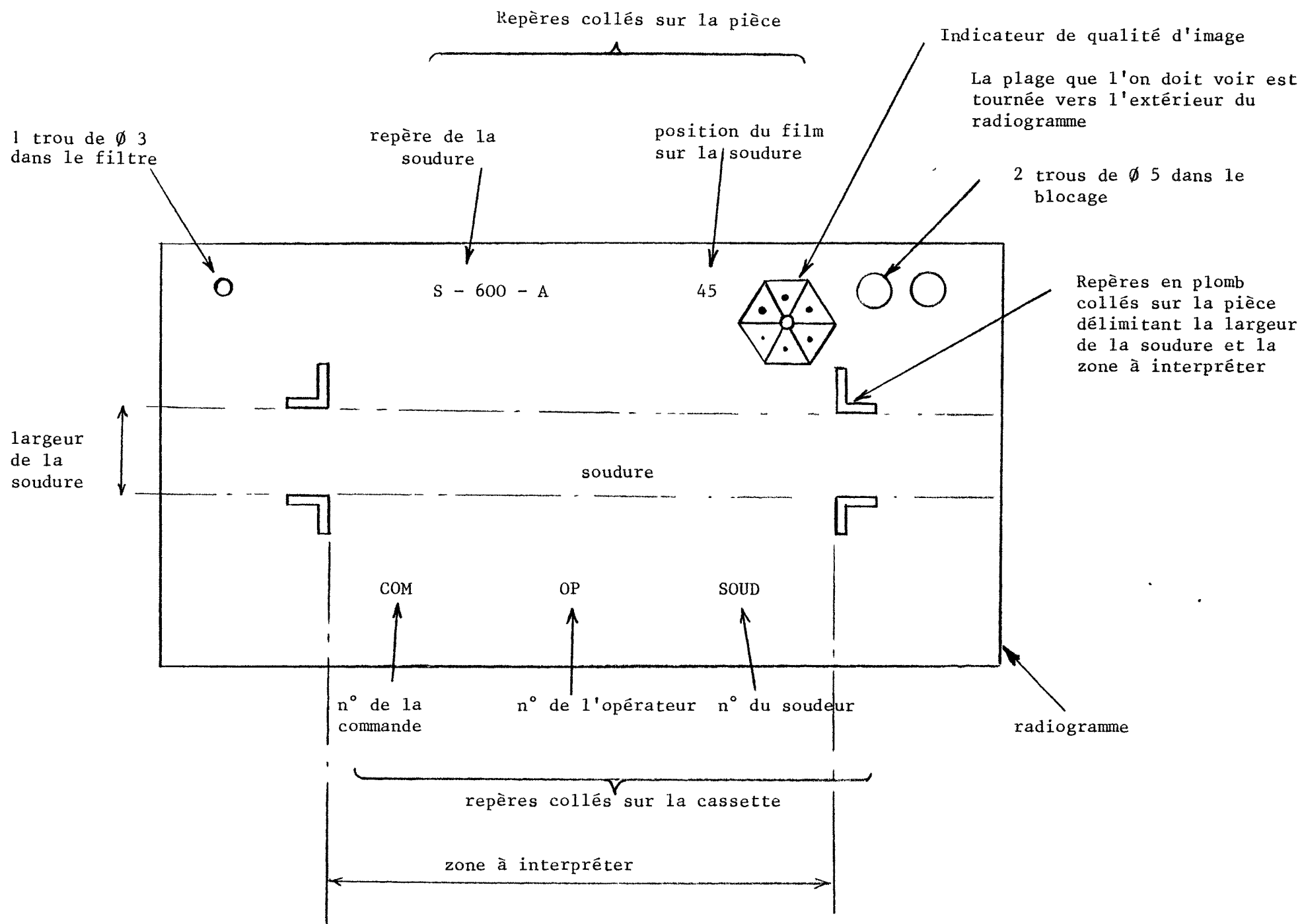
La technique mise en oeuvre doit être conforme en tous points à la spécification. Toute modification doit faire l'objet d'un accord entre le fabricant et l'acheteur. Une importante différence apparaît donc entre les deux techniques :

* En ultrasons, le client n'a aucun moyen de contrôle "a posteriori"! Son seul recours est de déléguer des inspecteurs chez le fabricant pendant la durée du contrôle. A moins qu'il ne préfère recommencer le contrôle chez lui, après réception.

* En radiographie, l'inspection par le client en cours de prise de cliché se pratique parfois, mais il est préférable de juger les "résultats" puisqu'un document permanent existe, le radiogramme. L'inspecteur juge donc de la qualité de la technique de contrôle en dépouillant le dossier de films. Il s'agit donc ici de refuser ou d'accepter le radiogramme lui-même. L'inspecteur jugera en particulier :

- la qualité du développement (tâches, pliures)
- le marquage (repérage) de la pièce et du film
- la présence du filtre (1 trou de \varnothing 3 mm)
- la présence du blocage (lettre B ; 2 trous de \varnothing 5 mm)
- la densité du film ($2,7 \leq D \leq 3,9$)
- la qualité d'image (diamètre du plus petit trou visible sur l'IQI).

La figure de la page suivante montre le genre d'indications que l'on doit trouver sur un radiogramme.



La radiographie est la seule technique qui permette au client de juger a posteriori la finesse du contrôle qui a été pratiqué. Il s'agit en quelque sorte, d'un "contrôle au 2e degré" de la part du client.

b/ Caractérisation des défauts observés

b/1. Nature des défauts

* En ultrasons, il est impossible de connaître directement la nature exacte d'un défaut. Il est toutefois possible de la deviner d'après la position du défaut dans le cordon et d'après la connaissance que doit avoir l'opérateur (ou l'inspecteur) de la technique de soudage.

La seule distinction que l'on puisse faire est la distinction entre défauts volumiques et défauts plans. On procède, dans ce but, à un examen complémentaire en tournant le palpeur de 10 degrés autour de l'axe du défaut. S'il est volumique, l'écho de défaut ne doit pas varier beaucoup à l'issue de cette rotation de 10 degrés. S'il est plan au contraire, l'écho de défaut doit voir son amplitude diminuer sensiblement puisque l'impulsion ne retourne pas en direction du palpeur.

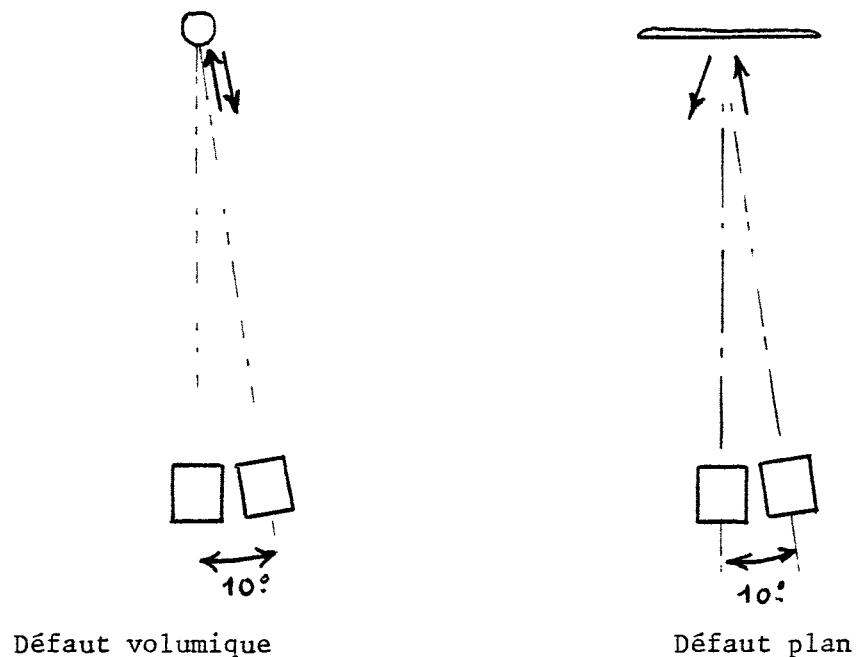


Figure : Vue de dessus d'un défaut dans une plaque plane,
et recherche du type auquel il appartient

On admet arbitrairement que si une rotation de 10 degrés entraîne une diminution de l'écho inférieure à 50 % (soit 6 dB), le défaut est volumique. Dans le cas contraire, il est plan. Cette distinction reste souvent toute théorique car, dans la réalité, les défauts volumiques donnent des échos très faibles ou même illisibles.

* En radiologie, au contraire, chaque type de défaut se reconnaîtra facilement, à l'observation du radiogramme, par sa forme et sa densité optique. L'inspecteur sera, bien entendu, guidé par la position du défaut au sein de la soudure.

b/2. Position du défaut dans la pièce

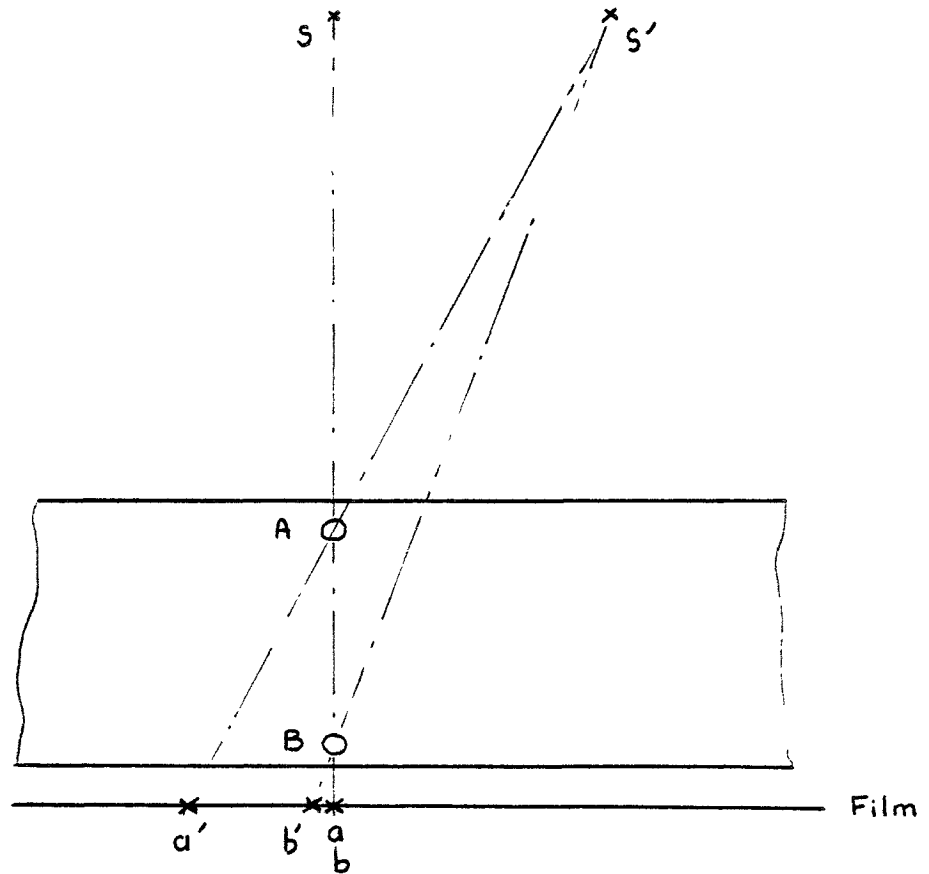
* En ultrasons, position dans le plan et profondeur du défaut sont assez facilement connues.

* En radiologie, la position dans le plan est mesurable sur le radiogramme, mais la profondeur est inconnue. Il faut pratiquer un contrôle supplémentaire pour préciser ce point :

- soit en effectuant un sondage par ultrasons
- soit en pratiquant un tir stéréographique.

Le tir stéréographique permet, à l'aide de deux prises de clichés pratiquées sur le même film, de calculer la profondeur d'un défaut (ou d'une série de défauts) dans une pièce. Il se déroule ainsi : on effectue une prise de cliché (la source étant au point S) que l'on interrompt lorsque la moitié du temps de pose est écoulé. La source est alors déplacée en S' et la prise de clichés est achevée.

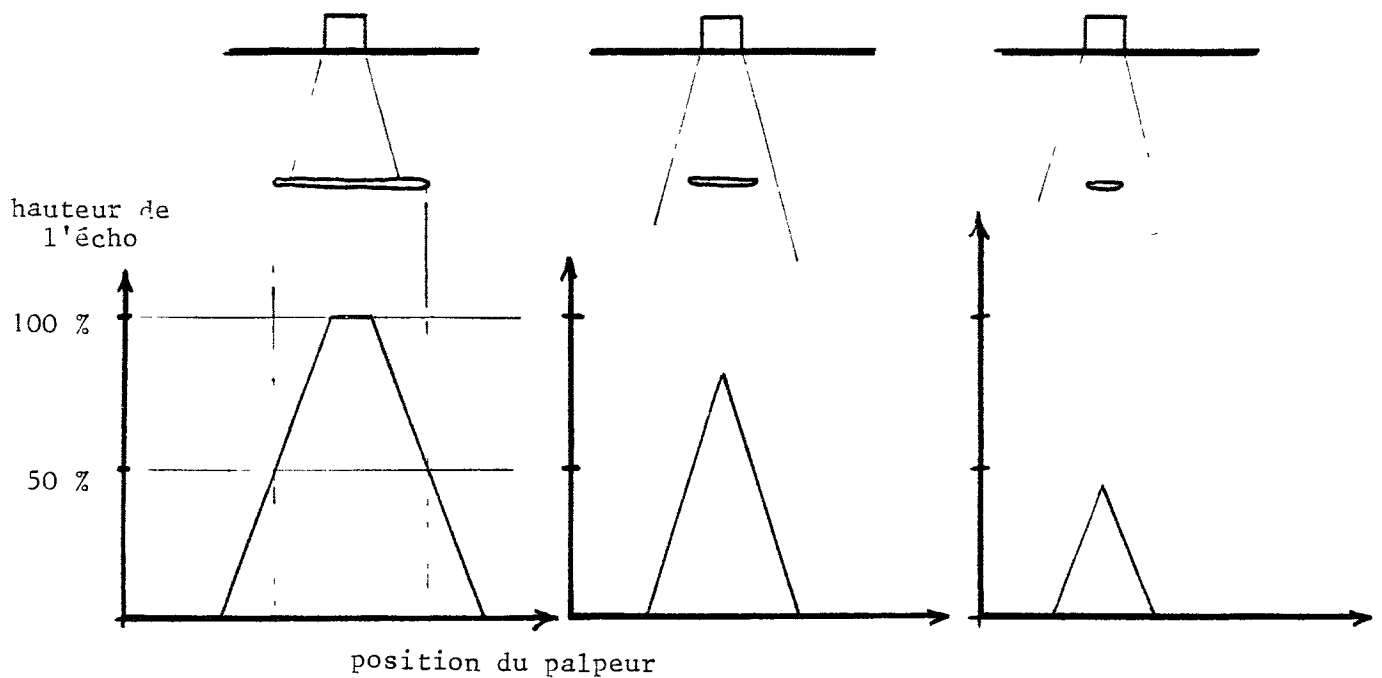
Dans ces conditions, un défaut situé près du film donnera deux images très proches l'une de l'autre, alors qu'un défaut situé plus loin du film donnera des images distinctes. Une mesure de la distance entre les deux images permettra de calculer la profondeur à laquelle se situe le défaut dans la pièce.



Exemple de tir stéréographique

b/3. Dimensions du défaut

★ En ultrasons, il est très difficile de connaître la taille des défauts.



La figure montre la hauteur de l'écho de défaut en fonction du déplacement du palpeur pour trois défauts de tailles différentes.

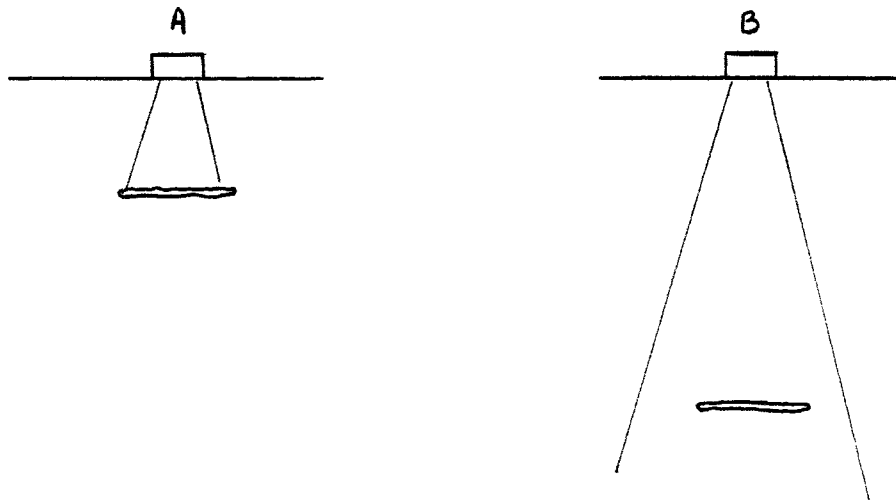
La dimension du défaut dans le plan perpendiculaire au faisceau ultrasonore modifie la largeur et l'amplitude de l'écho !

De plus, ce n'est pas la dimension absolue du défaut qui compte mais sa dimension relative par rapport à la largeur du faisceau.

Or, la largeur du faisceau ultrasonore change avec :

- le diamètre de la pastille
- le matériau examiné
- la fréquence.

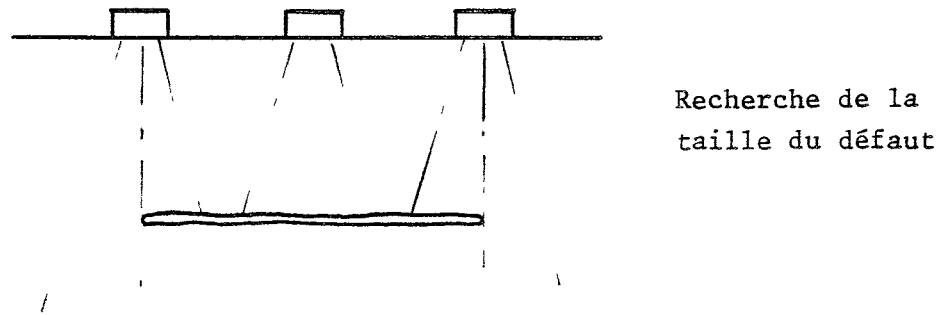
Mais, même dans des conditions bien définies, la largeur du faisceau change avec la profondeur à laquelle on opère dans le matériau.



La figure montre qu'un défaut de dimensions données peut être plus grand ou plus petit que la largeur du faisceau suivant la position qu'il occupe dans la pièce.

Dans le cas d'un petit défaut, on essaie de relier ses dimensions à la hauteur de l'écho. Dans la pratique, on compare la hauteur de l'écho de défaut (H_M) soit à un écho de référence situé à la même distance (H_0) soit à l'écho de fond (dans le cas où cet écho de fond existe).

Dans le cas d'un grand défaut, on admet qu'au cours du balayage les bords du défaut sont donnés par les positions du palpeur qui donnent un écho valant 50 % de l'écho de défaut maxi (soit - 6 dB).



* En radiologie, le problème est beaucoup plus simple puisque les défauts sont vus pratiquement en vraie grandeur et que l'on peut mesurer les deux dimensions qui sont directement accessibles.

La troisième dimension (épaisseur du défaut) peut être estimée avec une bonne précision en jugeant la densité optique du défaut.

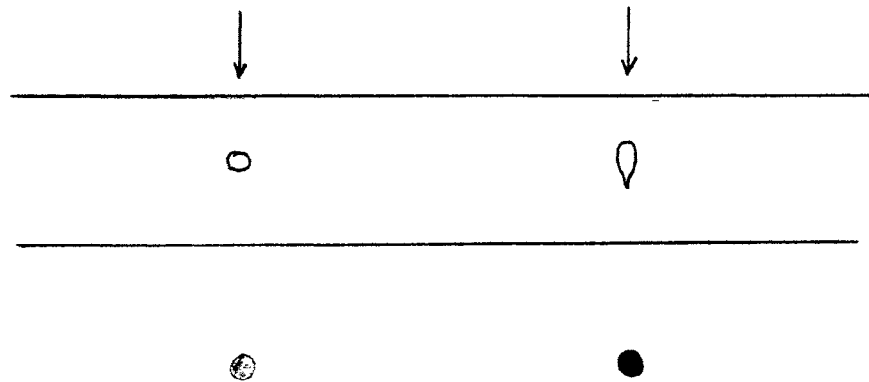


Image de la soufflure ronde

Image de la soufflure
vermiculaire

La figure montre la différence de densité entre les images données par une soufflure ronde et une soufflure vermiculaire.

Notons qu'il n'est pas facile de mesurer cette épaisseur avec précision ; il s'agit néanmoins d'une indication très utile.

c/ Acceptation des défauts

L'acceptation d'un défaut ou d'une série de défauts se fait à l'aide d'un code.... et après de longues discussions.

Les codes sont très nombreux et nous nous bornerons à citer quel-

ques exemples.

Exemple 1 : Contrôle des soudures par ultrasons

Code EDF (Cahier des Prescriptions de Fabrication et de Contrôle
C.P.F.C.) pour les chaudières nucléaires à eau.

Deux défauts sont considérés comme constituant un seul défaut si la distance qui les sépare est inférieure ou égale à six fois la longueur du plus petit, ou à 20 mm si l'un des défauts est ponctuel. Cette condition ne s'applique qu'à des défauts situés dans un volume de métal limité par des plans parallèles aux surfaces de la tôle, distants l'un de l'autre de moins de 20 mm.

On définit deux classes de sévérité. La classe à prendre en considération doit être précisée aux Spécifications techniques.

Les critères d'acceptation, établis en fonction du rapport HM/Ho et de la longueur L du défaut, sont donnés dans le tableau ci-après :

Hauteur de l'écho de défaut HM	Nature du défaut	Décision	
		Classe 1	Classe 2
Indifférente	Non volumique	A réparer	A réparer
$Ho < HM$	Volumique	A réparer	A réparer
$\frac{Ho}{2} < HM \leq Ho$	Volumique	Toléré si $L \leq 20 \text{ mm}$	Toléré si $L \leq 40 \text{ mm}$
$HM \leq \frac{Ho}{2}$	Volumique	Toléré si $L \leq 40 \text{ mm}$	Toléré si $L \leq 80 \text{ mm}$

NOTA :

- a/ Les échos tels que $HM \leq \frac{Ho}{4}$ ne sont, en général, pas significatifs de défauts devant faire l'objet d'une réparation. Toutefois, si L est supérieure à 80 mm ou si le caractère non volumique du défaut peut être par ailleurs présumé, le constructeur doit procéder à des examens complémentaires permettant de déterminer la nature du défaut, avant de soumettre à EDF sa proposition de décision.
- b/ Dans le cas où la hauteur HM de l'écho ou la longueur estimée L d'un défaut dépasse les limites fixées dans le tableau ci-dessus, sans excéder les valeurs fixées en c/ ci-après, le constructeur peut proposer que ce défaut ne soit pas réparé, lorsqu'il estime que, compte tenu des examens

complémentaires effectués, de la localisation et de la nature du défaut, des conditions de travail de la pièce et de tous autres éléments d'appréciation, un tel défaut n'est pas préjudiciable à la tenue de cette pièce.

EDF dispose d'un délai de dix jours à compter de la réception de la demande motivée du constructeur, pour s'opposer, s'il le juge nécessaire, à ce que le défaut soit laissé en l'état.

c/ Les dispositions du § b ci-dessus ne sont applicables que dans le mesure où les conditions ci-après sont remplies :

- pour $HM \leq \frac{H_o}{2}$, $L \leq 60$ mm pour la classe 1
 $L \leq 100$ mm pour la classe 2
- pour $\frac{H_o}{2} < HM \leq \frac{3H_o}{4}$, $L \leq 30$ mm pour la classe 1
 $L \leq 60$ mm pour la classe 2

Pour $HM > \frac{3H_o}{4}$, aucune marge, autre que celle qui tient à l'imprécision des mesures, n'est tolérée.

Le tableau mentionne bien tous les critères que nous avons analysés au paragraphe b/ caractérisation des défauts, c'est-à-dire :

- la nature du défaut (volumique ou non)
- les dimensions des défauts
- la hauteur de l'écho
- la position relative des défauts dans le sens de la profondeur.

Exemple 2 : Contrôle des soudures par radiographie
Code EDF (C.P.F.C.)

Nature du défaut	Décision	
	Classe 1	Classe 2
Fissure, critique, collage, manque de pénétration, caniveau	A réparer	A réparer (1) (2)
Inclusion	Tolérés si sa plus grande dimension reste inférieure : (2) (3) (4) (5)	
	1,5 mm pour $e < 5$ mm 3 mm pour $e = 5$ à 9 mm $e/3$ mm pour $e = 9$ à 60 mm 20 mm pour $e > 60$ mm	5 mm pour $e < 10$ mm $e/2$ mm pour $e = 10$ à 60 mm 30 mm pour $e > 60$ mm

Une soufflure, même isolée, est inacceptable si sa plus grande dimension est supérieure à la valeur donnée dans le tableau ci-après :

(1) Epaisseur de la paroi e (en mm)	Plus grande dimension de la soufflure (en mm)	
	Classe 1	Classe 2
$e < 5$	1	1,5
$5 \leq e \leq 10$	1,5	2
(2) $10 < e \leq 20$	2	2,5
$20 < e \leq 40$	2,5	3
$e > 40$	3	4

Deux soufflures sont réputées appartenir au même nid ou au même alignement si la distance qui les sépare est inférieure à cinq fois la dimension maximale de la plus grosse.

Est inacceptable tout nid ou tout alignement de soufflures intéressant une longueur de joint soudé supérieure à :

Classe 1
0,5 e ou 30 mm

Classe 2
 e ou 50 mm

- (1) - Les manques de pénétration situés dans le 1/3 intérieur de l'épaisseur de la paroi pourront être tolérés pour autant que leur longueur reste inférieure à l'épaisseur, avec une longueur maximale de 60 mm.
- (2) - Deux défauts sont considérés comme formant un même défaut si l'intervalle qui les sépare est inférieur à 6 fois la longueur du plus court d'entre eux.

- (3) - Dans le cas d'inclusions de laitier alignées, leur longueur cumulée, comptés sur une longueur égale à $12e$, doit être au plus égale à e .
- (4) - Des défauts inférieurs aux limites de ces critères, situés au voisinage de la surface dans des zones sollicitées à la fatigue, pourront néanmoins être jugés inacceptables par accord entre le constructeur et EDF.
- (5) - Des inclusions, dont la longueur lue en double film serait supérieure aux limites de ces critères, peuvent faire l'objet d'une demande d'acceptation soumise à EDF, si elles se trouvent à une profondeur inférieure au $1/3$ central de la paroi.

Ici encore, on juge la gravité des défauts en utilisant tous les critères du paragraphe b/ caractérisation des défauts :

- nature des défauts
- dimensions des défauts
- position des défauts dans la paroi (règle (1) du $1/3$ médian).

Exemple 3 : Contrôle des soudures par radiographie
Code ASME, section VIII
Critères d'acceptation des soufflures.

On va, dans ce cas, compter le nombre de soufflures ou, plus exactement, la surface totale des soufflures pour une longueur de soudure de 6 inches.

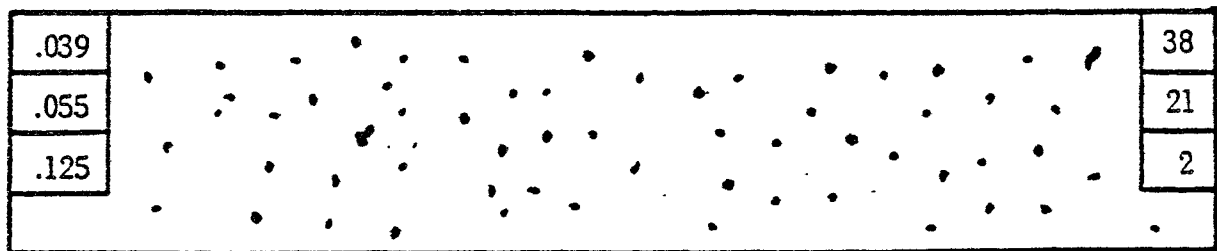
Soudure d'épaisseur 2 inches (50 mm)

Diamètre des
soufflures (en inches)

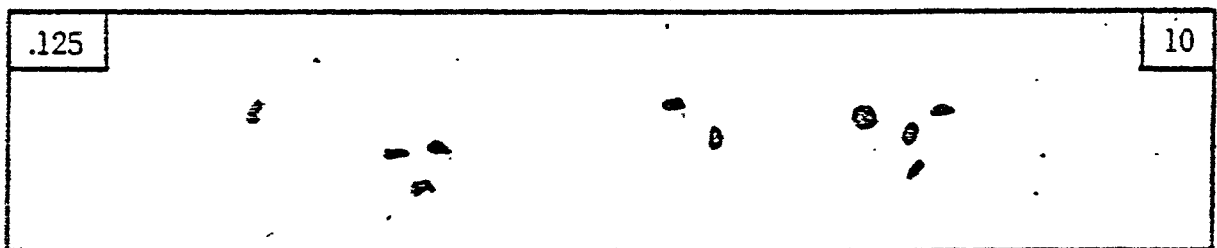
Nombre de
soufflures

Dimension

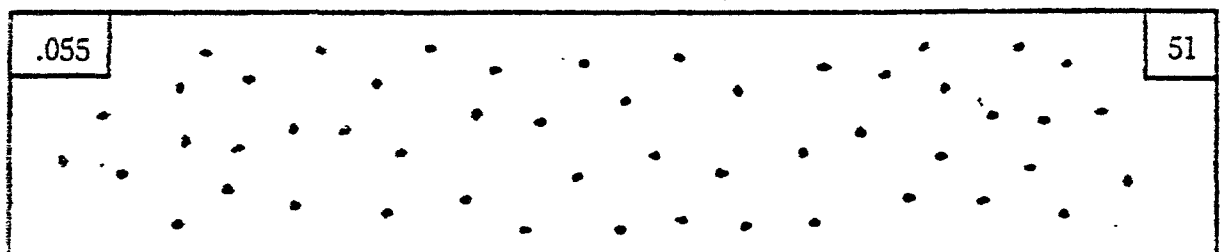
No. of Pores



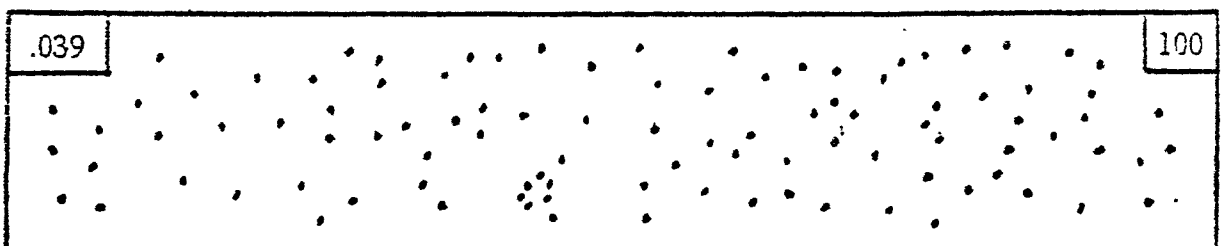
ASSORTED



LARGE



MEDIUM



FINE

Exemple 4 : Contrôle des pièces moulées par radiographie.

Utilisation des radiogrammes de références A.S.T.M.

Pour chaque type de défaut et chaque classe ou niveau de sévérité, on comparera le radiogramme de la pièce examinée avec un radiogramme de référence.

Sur une surface de 5 inches par 7 inches, on ne devra pas trouver plus de défauts et des défauts qui ne soient pas plus gros que sur le cliché de référence.

d/ Rédaction d'un procès-verbal

Quelle que soit la technique utilisée, chaque examen donne lieu à la rédaction d'un document qui indique :

- le nom du fabricant
- la pièce examinée (type, numéro,...)
- le stade de la fabrication où se situe l'examen
- les conditions opératoires
- les résultats de l'interprétation
- le nom du contrôleur.

Le contrôle est ainsi achevé, au moins pour les pièces saines, car pour les pièces défectueuses, il faut encore :

- affouiller
- contrôler à fond de fouille
- recharger
- contrôler après recharge.

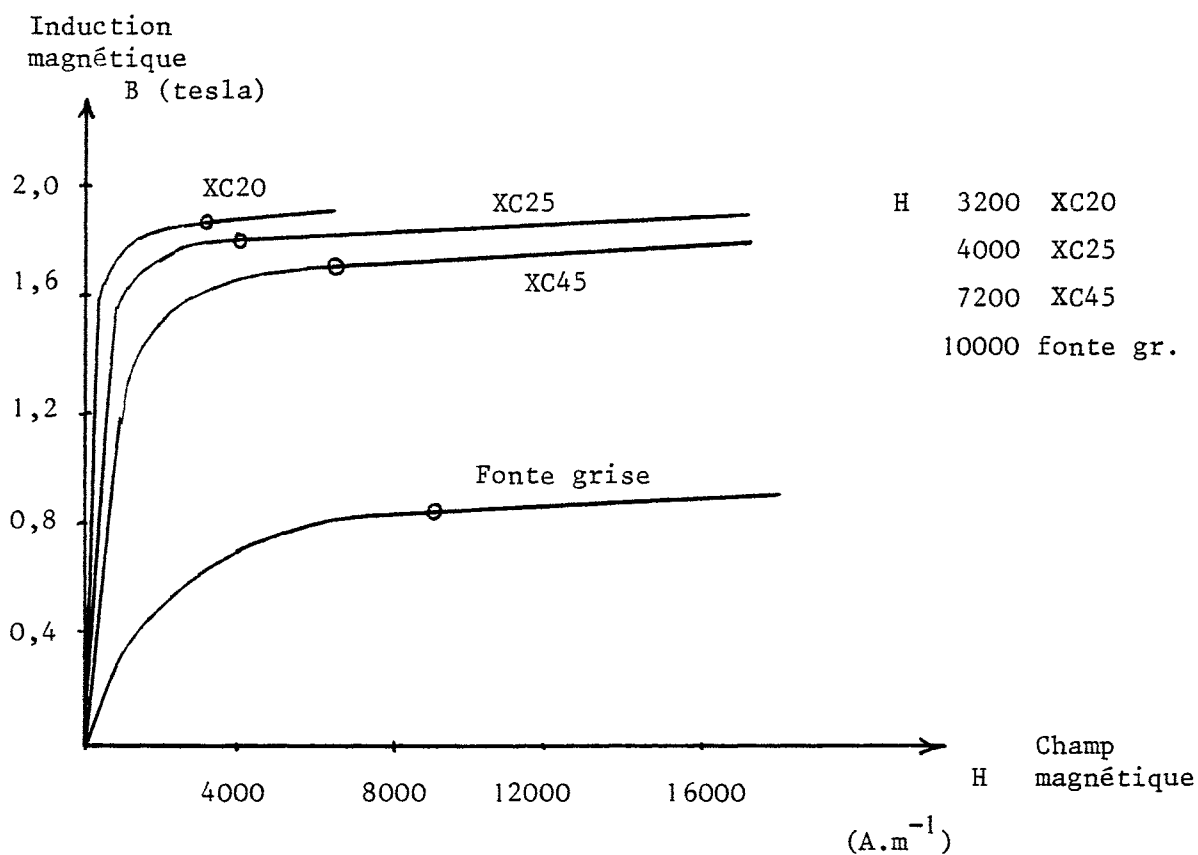
DETECTION DES DEFAUTS SUPERFICIELS

I - MAGNETOSCOPIE

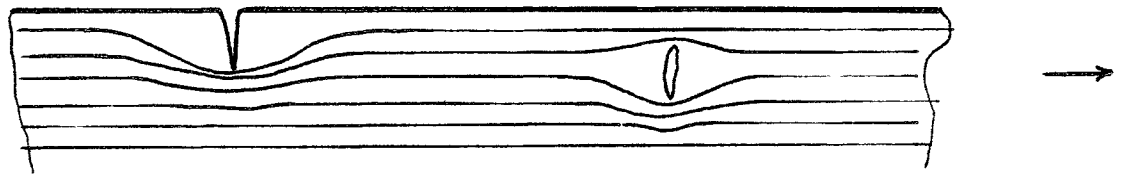
Il s'agit d'une méthode d'essais applicable aux matériaux ferromagnétiques. Les aciers austénitiques, les alliages légers et les alliages cuivreux ne se prêtent donc pas à ce type d'examen.

1. Principe

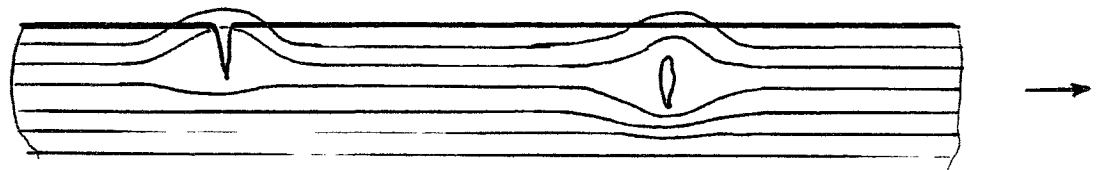
Le matériau est soumis à l'action d'un champ magnétique, continu ou alternatif, d'une intensité suffisante pour dépasser légèrement le coude de début de saturation de la courbe induction-champ.



Une discontinuité du métal provoque l'apparition d'un champ de fuite intense si le métal est saturé.



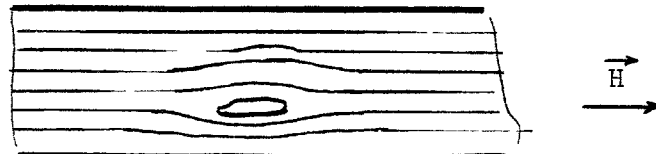
Métal non saturé



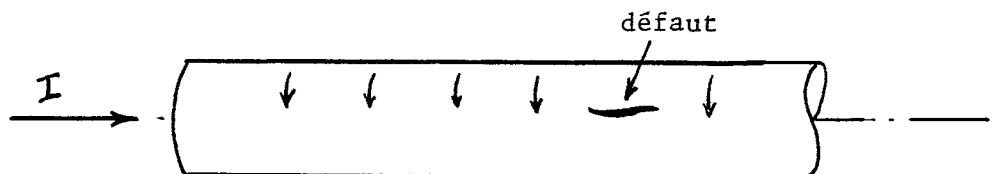
Métal saturé

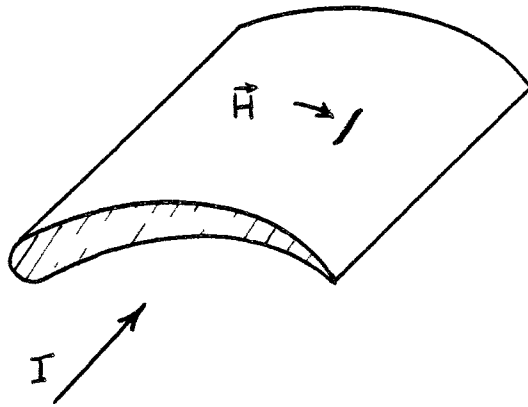
L'application, sur la surface de la pièce, d'une poudre magnétique fine (sèche ou en suspension dans un liquide) révèle le défaut.

Un défaut éloigné de la surface ou orienté parallèlement au champ \vec{H} ne sera pas détecté.



2. Magnétisation circulaire ou transversale



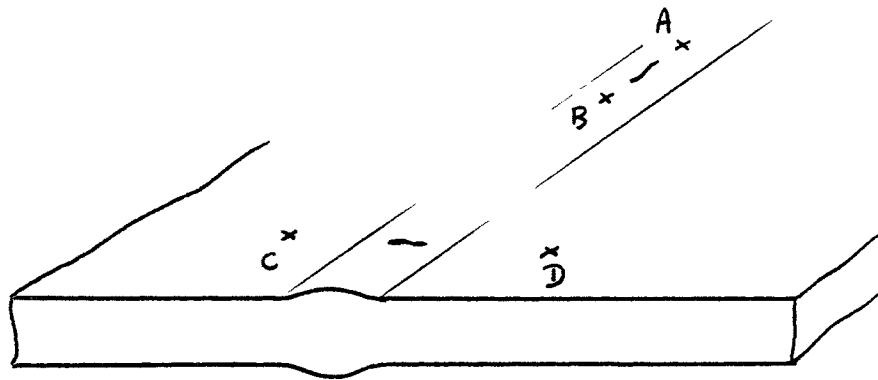
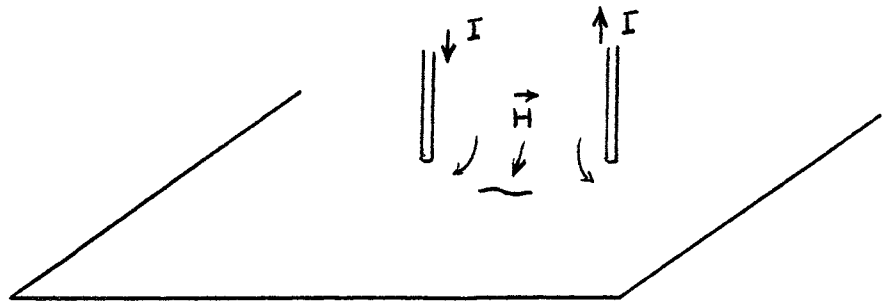


Application: pièce
non circulaire ailette
de turbine

$I \simeq 1200 \text{ A}$ pour une section de 6 cm^2

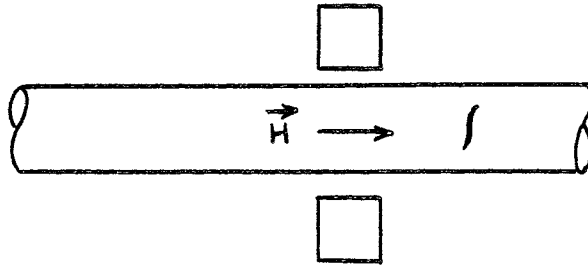
Circulation de courant localisée

Méthode utilisée pour les tôles ou les cordons de soudure.

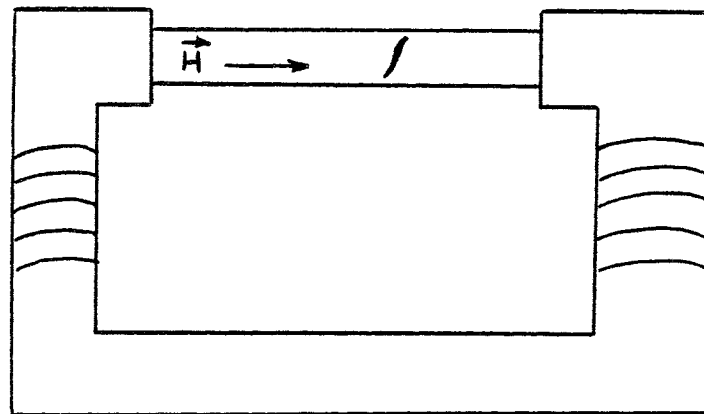


3. Magnétisation longitudinale

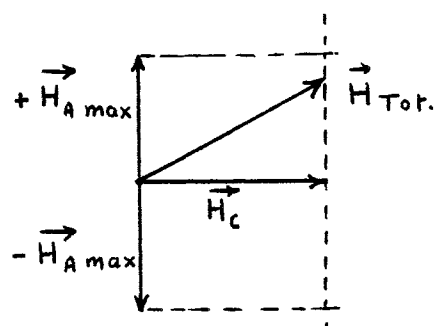
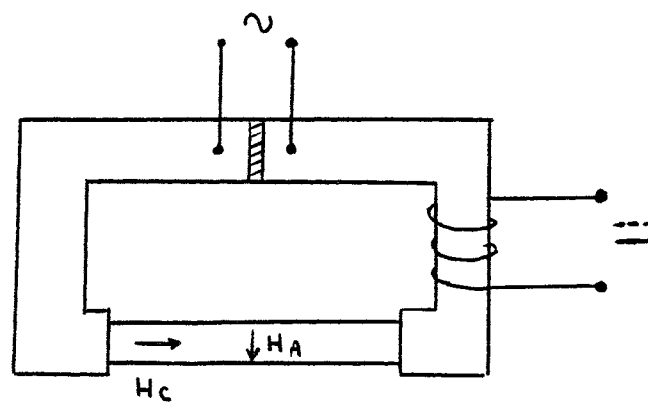
La pièce est positionnée à l'intérieur d'un solénoïde (ou bobine plate) :



ou placée entre les pôles d'un électro-aimant :

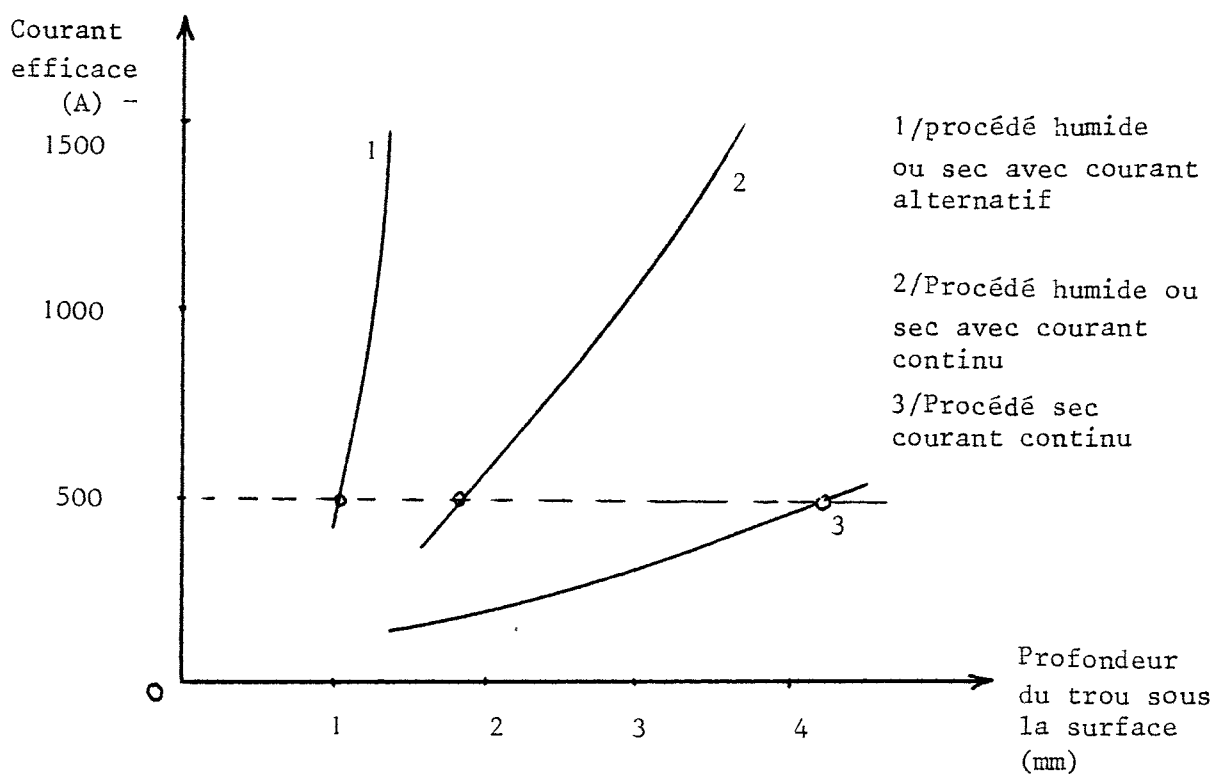


4. Magnétisation combinée



5. Profondeur de pénétration

- Les courants alternatifs donnent des champs importants, surtout en surface.
- Les courants continus donnent des champs mieux répartis en profondeur et chauffent moins la pièce.
- L'application d'une poudre magnétique sèche permet la mise en évidence de défauts plus profonds que l'application d'une poudre en suspension dans un liquide (liqueur magnétique).



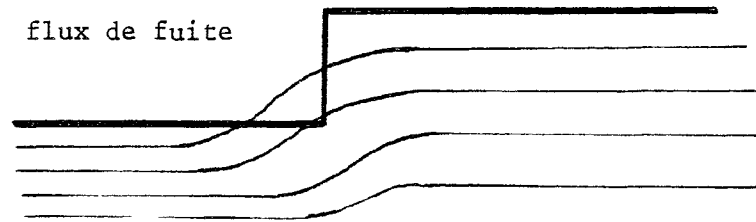
Profondeur de pénétration

(Essai réalisé à l'aide d'un témoin percé)

6. Pseudo-défauts

Des accumulations de poudre magnétique peuvent se produire sur des pièces saines en des points particuliers :

- sur des inégalités de surface
- sur des modifications de structure de la pièce (dépôts de cémentite)
- aux changements de section de la pièce
- au fond des filetages



Une telle accumulation de poudre peut rendre impossible la détection d'une véritable fissure. L'utilisation du ressuage permet alors de lever le doute.

Pour faciliter les opérations suivantes (usinage, manutention), il est utile, après le contrôle, de démagnétiser les pièces, tout au moins celles dans lesquelles le champ est longitudinal et se referme dans l'air.

II - RESSUAGE

Il s'agit d'un contrôle par pénétration de liquide qui met en évidence les défauts débouchants :

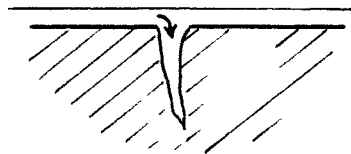
- fissures d'usinage
- tapures de traitements thermiques
- porosités, piqûres de fonderie ou de soudage
- criques de fatigue
- replis de laminage ou de forgeage

Il s'applique à presque tous les matériaux (quelques problèmes avec les plastiques et les corps poreux).

1. Principe

a/ Le produit pénétrant

Un liquide est étendu sur la pièce. Il pénètre dans les défauts. L'infiltration n'est pas immédiate.



Ce produit est soit coloré
soit fluorescent

b/ L'éliminateur pénétrant

C'est un liquide solvant, utilisé pour nettoyer l'excès de produit. Cette phase est assez délicate :

- trop poussée, elle élimine le produit jusqu'au fond des défauts

- trop rapide, elle laisse subsister du produit à la surface de la pièce.

c/ Le révélateur

En poudre (révélateur sec), ou en suspension dans un solvant (révélateur humide), le révélateur est appliqué par trempage ou au pistolet.

Un séchage est nécessaire.

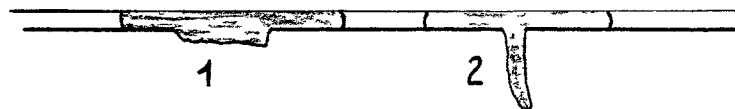
A l'aide d'une lampe classique (cas des produits pénétrants colorés) ou d'une lampe à ultra-violets (cas des produits pénétrants fluorescents), on observe alors la surface enduite de révélateur sec.

Le liquide qui s'est introduit dans les fissures, remonte petit à petit dans le révélateur et le teinte.



Le défaut est ainsi élargi et devient nettement visible.

La surface de la tâche indique le volume du défaut, tandis que le temps mis par le liquide pour remonter indique la profondeur du défaut.



Exemple : cas de deux défauts donnant la même surface de tâche car ayant même volume. Dans le cas 1, toutefois, la diffusion du liquide sera plus rapide que dans le cas 2.

/ Remarque /

La répétition d'un contrôle par ressuage sur la même pièce, doit donner lieu à un nettoyage soigné, dans le cas où la seconde technique utilise un produit pénétrant différent du premier. Le mélange des produits pénétrants peut en effet, empêcher l'action du révélateur.

2. Hygiène du travail

L'emploi des solvants ainsi que l'utilisation des rayons ultraviolets doivent être assortis de quelques précautions (port de gants, de lunettes,...).

III - COURANTS DE FOUCAULT

Les techniques mettant en oeuvre les courants de Foucault sont utilisées pour la recherche des défauts métallurgiques (fissures, soufflures, inclusions) dans les barres, tubes et fils.

L'avantage des courants de Foucault sur les méthodes ultrasonores et magnétiques réside dans l'absence de contact avec les échantillons à contrôler et la possibilité de vérification à grande vitesse.

Les courants de Foucault permettent également la mesure des épaisseurs des plaques ou tubes, la détermination de l'épaisseur d'un revêtement et le tri entre des matériaux ayant des conductivités électriques ou des perméabilités magnétiques différentes.

1. Principe général

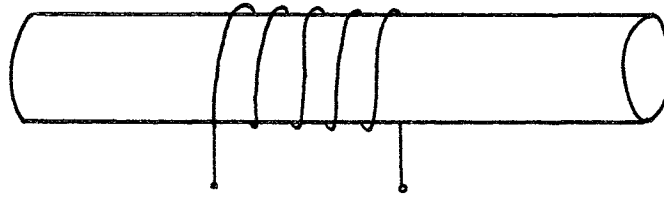
Un solénoïde, appelé bobine, induit un champ magnétique alternatif à travers la pièce sous examen, provoquant l'apparition des courants de Foucault.

Ces courants modifient l'impédance de la bobine excitatrice. L'existence de défauts dans la pièce à contrôler provoque des variations de l'impédance apparente de la bobine.

2. Détection des défauts à l'aide des courants de Foucault

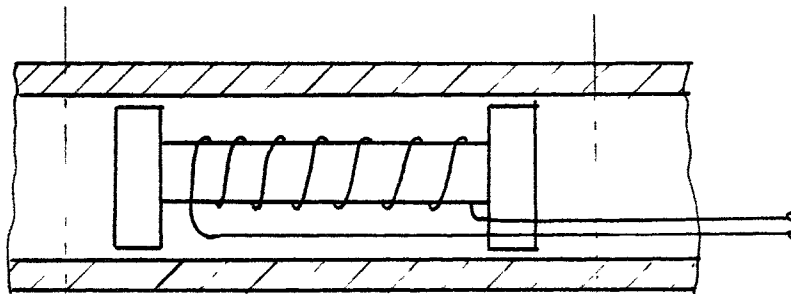
Bobines simples : Elles servent à créer le champ magnétique alternatif et, simultanément, à détecter les défauts, par la mesure de leur impédance.

Ainsi, les barres sont contrôlées à l'aide d'une bobine extérieure. La zone étudiée est un petit disque



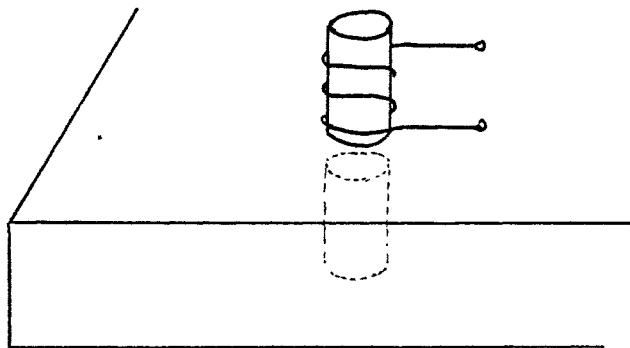
La barre défile à l'intérieur de la bobine dont l'impédance varie brutalement au passage d'un défaut.

Les tubes peuvent être contrôlés à l'aide d'une bobine extérieure ou intérieure. La zone étudiée est un petit anneau.



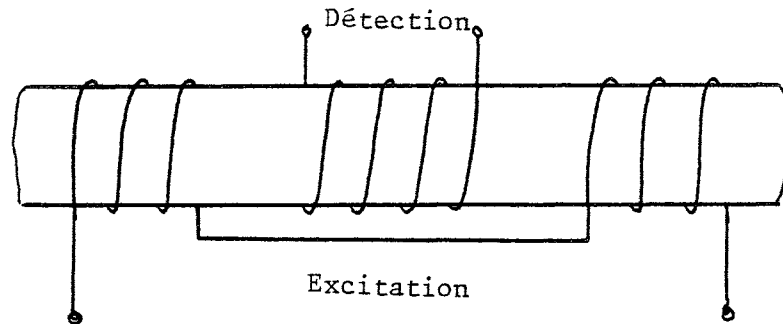
zone étudiée

Les plaques et les objets de formes irrégulières sont contrôlés à l'aide de petites bobines appelées sondes, qui permettent d'étudier un cylindre de l'échantillon dont la section est voisine de celle de la bobine.



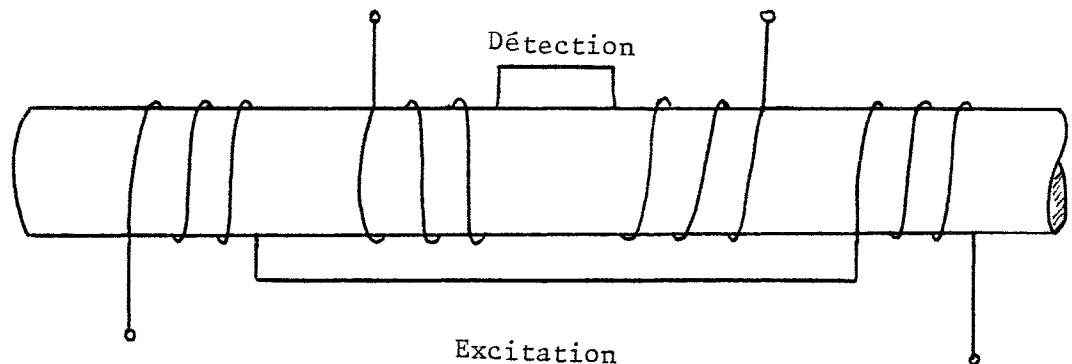
Bobines doubles : la bobine d'excitation induit le champ magnétique. Une bobine de détection, électriquement indépendante, permet de

détecter les défauts avec une grande sensibilité. La bobine d'excitation est divisée en deux parties placées de part et d'autre de la bobine de détection. On lit directement les variations de la f.e.m. aux bornes de la bobine détectrice.



Bobines différentielles : Il s'agit de comparer la pièce à étudier avec un échantillon.

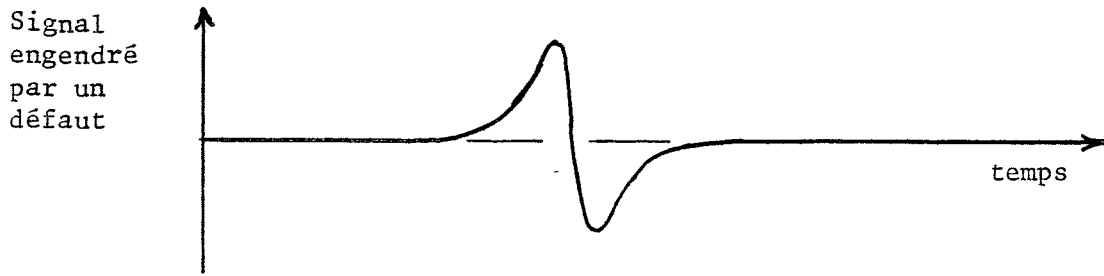
On peut également comparer deux régions différentes de la pièce à examiner. Le passage d'un défaut modifiera la f.e.m. aux bornes des deux bobines détectrices successivement.



Exemple : bobine double différentielle

Les deux parties de la bobine de détection sont connectées de telle manière que les f.e.m. induites s'annulent lorsque les matériaux sont identiques. Le passage d'un défaut modifie la f.e.m. dans chacun des deux éléments de détection successivement. On obtient un signal de défaut présentant deux pics opposés.

Les bobines différentielles sont très sensibles à la présence de petits défauts.



3. Profondeur de pénétration des courants de Foucault dans le cas d'un barreau plat

L'intensité des courants de Foucault est maximale à la surface du matériau étudié et diminue, en profondeur, suivant une loi approximativement exponentielle.

Dans un barreau plat, on peut écrire :

$$I = I_0 e^{-\delta \sqrt{\pi f \sigma \mu}}$$

avec :

I_0 : intensité à la surface du barreau

δ : profondeur en m

f : fréquence en Hz

σ : conductivité électrique du matériau en $\text{mh}\cdot\text{m}^{-1}$

μ : perméabilité magnétique de Henry $\cdot \text{m}^{-1}$

Par convention, on appelle profondeur de pénétration standard la profondeur pour laquelle :

$$I = 0,37 I_0$$

$$\text{c'est-à-dire } I = I_0 \cdot e^{-1}$$

Dans un conducteur plat, cette profondeur vaut donc :

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}$$

Dans le cas des matériaux amagnétiques (alliages légers, alliages cuivreux, zinc...) on a : $\mu = 4 \pi 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

donc :

$$\delta_c = \frac{1503}{\sqrt{f \cdot \sigma}}$$

Exemple :

Pour le duralumin, σ vaut $34 \cdot 10^6 \text{ mh}\cdot\text{m}^{-1}$. Si l'on engendre des courants de Foucault à la fréquence $f = 5000 \text{ Hz}$, on aura une profondeur de pénétration :

$$\delta = 0,0012 \text{ m soit } 1,2 \text{ mm}$$

A n n e x e

LES RISQUES D'IRRADIATION DANS LE DOMAINE DE LA RADIOLOGIE INDUSTRIELLE
--

Protection des travailleurs et du public contre
les rayonnements ionisants (X, γ , électrons,
protons, neutrons)

La mise en oeuvre de tubes générateurs de rayons X ou de radioisotopes utilisés sous forme de "sources scellées" ne présente pas de risque de contamination puisqu'aucune matière radioactive (solide, liquide ou gazeuse) n'est émise.

Par contre, pendant la durée de "l'exposition", c'est-à-dire de la prise de cliché, le rayonnement électromagnétique émis par la source ou par le tube peut provoquer l'irradiation des personnes si aucune mesure n'est prise pour assurer leur sécurité.

A - RAPPEL DES UNITES EMPLOYEES EN RADIOLOGIE

1. L'exposition

La grandeur qui permet de mesurer directement les effets des rayonnements électromagnétiques s'appelle l'exposition. Elle s'exprime en roentgen (R).

Le roentgen est l'exposition qui libère une quantité d'électricité de 1 unité électrostatique de chaque signe dans un volume d'air de 1 cm³, température et pression normales (T.P.N.).

Un roentgen correspond donc à la création de $2,08 \times 10^9$ paires "electron-ion positif" dans un cm³ d'air dont la masse est 0,001293 grammes.

Attention : l'exposition n'est utilisable que pour les rayonnements électromagnétiques (X et γ) et dans un seul milieu, l'air T.P.N.

On relie aisément l'intensité du rayonnement au débit d'exposition qui s'exprime couramment en $R.h^{-1}$ ou en $m R.h^{-1}$.

Ces unités pratiques ne sont plus reconnues par la législation qui préconise, pour l'exposition, l'emploi du coulomb par kilogramme ($C.kg^{-1}$) et, pour le débit d'exposition, l'emploi de l'ampère par kilogramme ($A.kg^{-1}$).

$$\begin{aligned} 1 R &= 2,58.10^{-4} C.kg^{-1} \\ 1 R.h^{-1} &= 7,17.10^{-8} A.kg^{-1} \end{aligned}$$

2. La dose absorbée

La dose absorbée permet de mesurer l'énergie libérée par les rayonnements dans la matière qu'ils ont traversée. La relation entre exposition et dose absorbée est donc complexe et dépend de la nature physique et chimique de la matière considérée. L'unité est le rad. Il correspond à la libération de 100 ergs par gramme de matière.

Pour l'être humain, et pour une irradiation globale, une exposition de 1 roentgen correspond à une dose absorbée de 1 rad.

Le débit de dose s'exprime en rad.h^{-1} ou en mrad.h^{-1} .

L'unité légale est en fait le gray (Gy) qui correspond à 1 joule par kilogramme, et on a :

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

3. L'équivalent de dose

Dans la pratique, il fallait introduire une unité permettant d'apprécier les risques occasionnés par tous les types de rayonnements (ondes électromagnétiques ou particules). Les particules subissent de nombreuses interactions dans une seule cellule du corps humain et sont de ce fait plus dangereuses que les ondes électromagnétiques qui n'ont, avec la matière, que des interactions dispersées.

L'unité est le rem. Il exprime l'effet "Biologique" de l'irradiation. On a, en première approximation :

$$\text{Equivalent de dose (rem)} = \text{dose absorbée (rad)} \times \text{FQ}$$

avec FQ, facteur de qualité dépendant du type de radiation et donné dans des tables:

Type de radiation	F.Q.
rayons X et γ	1
électrons	1 à 2
protons	10
neutrons	3 à 10

On remarquera que, dans ce tableau, le rayonnement α n'est pas mentionné. Son libre parcours moyen dans l'air est en effet bien trop court pour que ce type de rayonnement présente un danger d'irradiation. Il est, de toutes façons, arrêté par l'épiderme.

En résumé, et pour parler en unités pratiques, nous voyons que, dans le cas des rayons X et γ :

$$1 \text{ roentgen (R)} \equiv 1 \text{ rad} \equiv 1 \text{ rem}$$

pour l'irradiation globale d'un être humain.

B - REGLEMENTATION

L'irradiation des travailleurs et du public est réglementée principalement par des décrets du 20 juin 1966 et des 15 mars et 25 octobre 1967.

La population est divisée en trois groupes :

- les travailleurs Directement Affectés à des Travaux sous Rayonnements (DATR)
- les travailleurs non DATR
- le public.

Le premier groupe travaille près des tubes ou des sources. Il doit obligatoirement porter un film dosimètre de poitrine et se soumettre à des examens médicaux particuliers. L'équivalent de dose moyen qu'il doit respecter est de 5 rem par an (au-delà de l'âge de 18 ans), sans dépasser 3 rem sur 3 mois consécutifs.

Le second groupe de travailleurs doit être protégé des fortes intensités par la mise en place de murs ou de barrières délimitant la "zone contrôlée". L'équivalent de dose ne doit pas dépasser 1,5 rem par an.

Le troisième groupe est constitué par toutes les personnes qui n'appartiennent pas à l'entreprise qui effectue des contrôles radiographiques ou qui ne travaillent pas pour elle ou en liaison avec elle. Ces personnes doivent être protégées de manière que l'équivalent de dose ne dépasse pas 0,5 rem par an, ce qui correspond à un débit de $0,25 \text{ mrem.h}^{-1}$ pour une durée de travail de 2000 heures par an.

C-Effets pathologiques des rayonnements ionisants.

Les différents effets pathologiques des rayonnements ionisants ont deux caractéristiques communes :

a) les dommages apparaissent toujours après un temps de latence. C'est, en effet, la fonction de réplication de l'A.D.N. qui est la plus radio-sensible, et les effets ne sont observables que lorsque les cellules irradiées se divisent. Le temps de latence correspond à la durée de vie moyenne des cellules irradiées : suivant le type de cellule considérée, cette durée peut aller de quelques jours à plusieurs années.

b) les dommages sont toujours non-spécifiques. Les affections engendrées par les rayonnements peuvent être engendrées également par d'autres moyens (brûlures, absorption de produits chimiques). Certaines affections s'observent même "naturellement" : c'est le cas des cancers, leucémies.

Il existe deux grands types d'effets, les effets à seuil et les effets aléatoires (ou stochastiques).

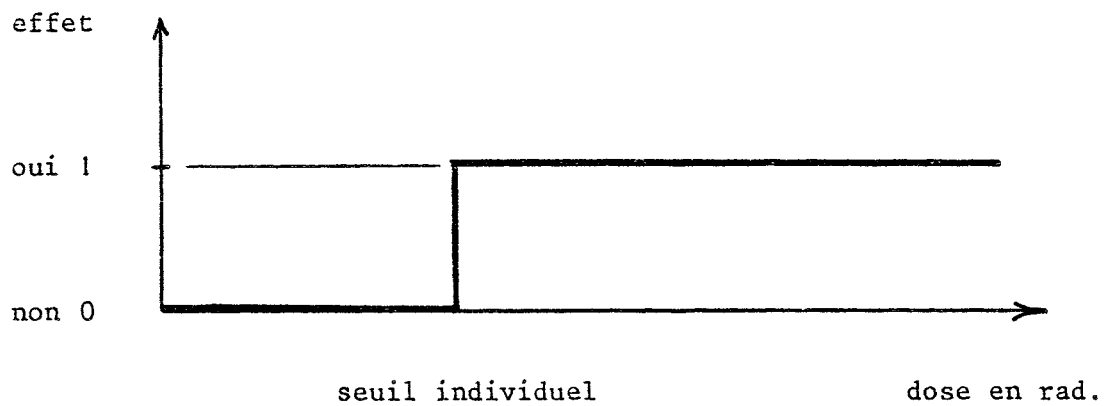
1-Effets à seuil.

Les traits caractéristiques de ces effets sont les suivants :

-Il existe un seuil de dose au-dessous duquel l'effet n'apparaît pas du tout.

-Pour des doses supérieures à la dose-seuil, les effets apparaissent chez tous les sujets irradiés et l'effet est d'autant plus grave que la dose est plus importante.

-La plupart de ces effets ont un temps de latence de quelques jours ou de quelques semaines.



Fog.18. Manifestation d'un effet à seuil sur un individu particulier.

Dans la pratique, le seuil varie légèrement d'un individu à l'autre et, pour une collection d'individus, on observe une dispersion qui conduit à une atteinte relative donnée par la figure 19.

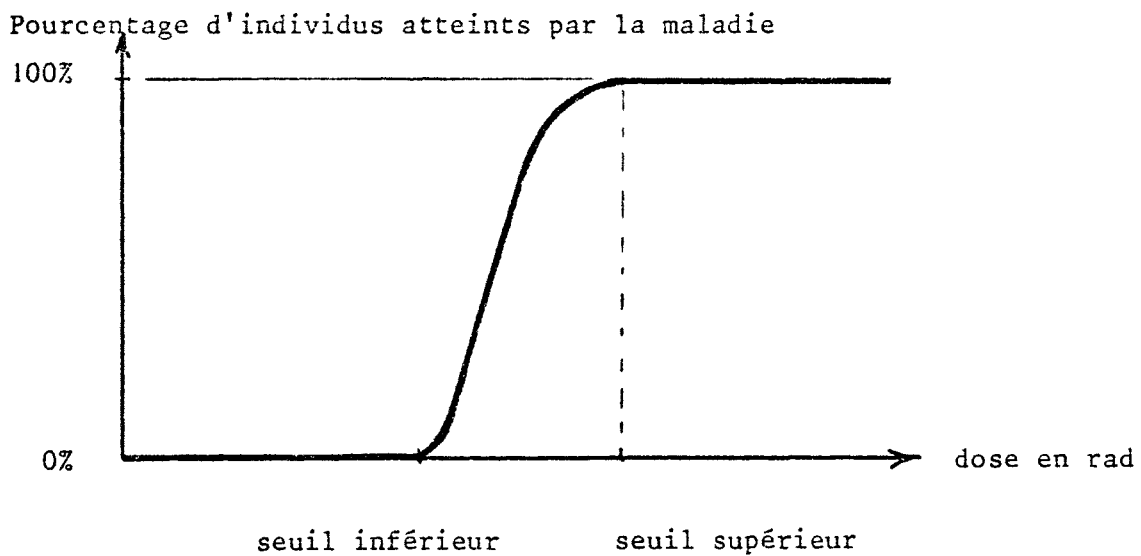


Fig.19. Pourcentage de malades. Cas des effets à seuil.

Pour des irradiations délivrées en une seule fois, et avec un débit important, c'est-à-dire lorsque les phénomènes de restauration n'interviennent pas, les principaux effets à seuil sont :

a) Destruction des tissus musculaires.

Le seuil se situe vers 600 rad pour des X ou des γ . Au-dessus de ce seuil, l'effet est d'autant plus grave et d'autant plus irréversible que la dose est forte.

Pour des doses croissantes, délivrées dans un membre (main par exemple), on observe les effets suivants :

- erythème (rougeurs) vers 600 rad,
- épilation temporaire,
- radiodermite (brûlures superficielles),
- phlyctènes (ampoules),
- ulcération (brûlure profonde),
- nécrose (mort des tissus) vers 3000 rad.

Les fortes doses laissent des traces indélébiles. On peut être conduit à amputer le membre.

b) Action sur le sang.

Les globules rouges qui véhiculent l'oxygène, les globules blancs qui défendent l'organisme et les plaquettes qui stoppent les hémorragies constituent les principales cellules du sang. Elles sont adultes et ne se divisent pas. Elles prennent naissance dans certains organes appelés "hématopoïétiques". La moelle des os, la rate et le thymus jouent un rôle important dans la production des cellules sanguines. Une irradiation des organes hématopoïétiques crée une variation profonde de la composition sanguine.

Le seuil se situe vers 20 rad. L'effet est d'autant plus grave et d'autant plus irréversible que la dose est forte.

La survie de l'individu, pendant les semaines qui suivent l'irradiation, n'est possible que par transfusion quotidienne de plaquettes et de globules rouges et par maintien en chambre stérile pour éviter toute infection qui serait fatale en l'absence de globules blancs.

Si les cellules qui constituent les organes hématopoïétiques ne sont pas tuées à 100%, leur activité reprend petit à petit et le malade guérit. Une irradiation brève et massive des organes hermatopoïétiques peut conduire à la mort. Une dose absorbée de 400 rad tue une personne sur deux environ. On parle dans ce cas, de dose semi-létale. Une dose de 600 rad est dite létale et entraîne la mort presque à coup sûr.

c) Opacification du cristallin.

Une irradiation du l'oeil provoque une opacification du cristallin si la dose dépasse 200 rad. Au-dessus de ce seuil, l'opacification est proportionnelle à la dose et peut aller jusqu'à la cataracte. Pour cet effet, le temps de latence est long (plusieurs années).

2-Effets aléatoires ou stochastiques.

Les traits caractéristiques de ces effets sont les suivants :

- Il n'est pas possible de trouver expérimentalement un seuil au-dessous duquel l'effet n'apparaît jamais.
- Il n'est pas possible d'engendrer l'effet sur 100% des sujets irradiés.
- Sur un individu donné, la gravité de l'effet est sans rapport avec l'importance de la dose reçue ; ce qui veut dire qu'un individu faiblement irradié pourra décéder alors qu'un autre, irradié plus fortement sera indemne.
- Sur un groupe d'individus irradiés dans les mêmes conditions, le pourcentage de malades est proportionnel à la dose absorbée par chaque individu appartenant au groupe.

- Les effets aléatoires apparaissent à long terme (plusieurs années).
- Les maladies engendrées sont en fait des maladies que l'on rencontre "naturellement".

Les leucémies (temps de latence : 4 ans) et les cancers (temps de latence : 15ans) sont des effets pathologiques aléatoires.

Pour chaque maladie, on trace un graphe donnant la fréquence des maladies en fonction de la dose absorbée. Les données dont on dispose sont :

- à dose nulle, la fréquence naturelle de la maladie, observée sur des populations non-irradiées.

- aux fortes doses, la fréquence de maladies observées à la suite d'accidents (travailleurs, scientifiques exposés accidentellement) ou à la suite d'explosion des bombes d'Hiroshima et de Nagasaki.

Dans le domaine des doses moyennes ou faibles, on dispose d'essais systématiques sur un grand nombre d'animaux (souris, chiens). On admet généralement que la relation dose-effet s'interpole linéairement entre la fréquence naturelle et la fréquence aux fortes doses (fig.20)

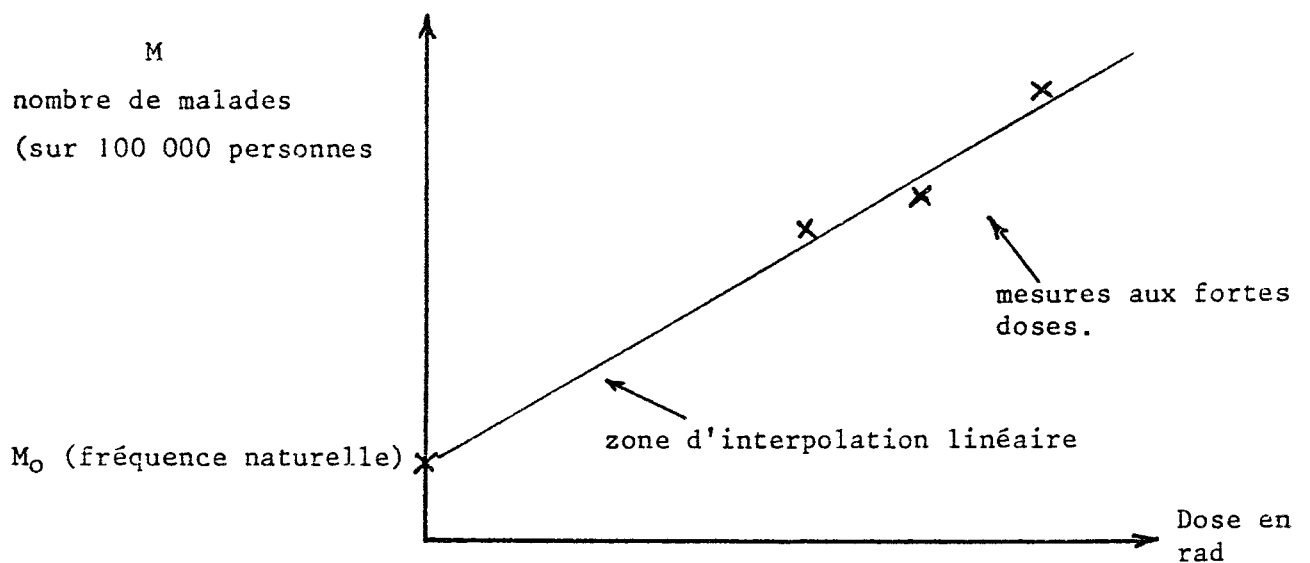


Fig.20.Fréquence des effets aléatoires en fonction de la dose.

Si, au nombre M de malades, on retranche le nombre M_0 de personnes naturellement atteintes, il reste $(M-M_0)$ qui représente le nombre de maladies induites accidentellement par la dose D . La droite représentative passe alors par l'origine (fig.21).

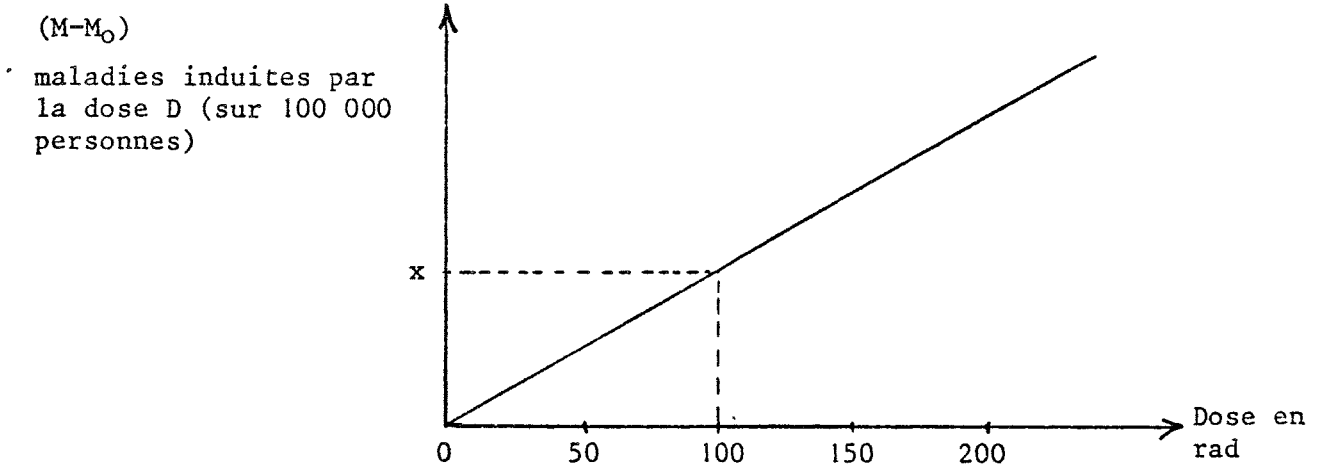


Fig.21. Fréquence des effets aléatoires (au-dessus de la fréquence naturelle) en fonction de la dose.

On lit par exemple qu'une dose de 100 rad délivrée à 100 000 personnes induira x maladies. Il s'agit d'un résultat expérimental puisqu'il correspond au domaine des fortes doses.

L'hypothèse de l'interpolation linéaire permet de calculer qu'une dose de 1 rad délivrée à 100 000 personnes induira $\frac{x}{100}$ maladies. Il s'agit d'un calcul, le nombre $\frac{x}{100}$ étant toujours trop faible pour pouvoir être confirmé par l'expérience.

Si nous considérons alors un nombre de personnes irradiées 100 fois plus important, le nombre de maladies sera également 100 fois plus important. Une dose de 1 rad délivrée à 10 000 000 de personnes induira donc x maladies.

Nous constatons donc que le même nombre x de maladies sera observées sur 100 000 personnes exposées à 100 rad et sur 10 000 000 de personnes exposées à 1 rad. On en déduit la notion très importante de dose collective qui s'exprime en Homme \times rad.

Ainsi, dans l'exemple que nous avons pris, une dose collective de 10^7 Homme \times rad induit x maladies. Nous allons illustrer maintenant cette méthode de calcul par un exemple pratique.

On a pu, expérimentalement, estimer à 50 le nombre de cancers qui surviendraient parmi 10 000 personnes exposées à 100 rad (soit une dose collective de 10^6 Homme \times rad). Cette estimation est assez précise car 50 cancers constitue un nombre important. Sur 10 000 personnes, on peut s'attendre à observer une quarantaine de cancers naturels : l'irradiation fera donc passer le nombre de maladies de 40 à 90. L'estimation est donc aisée.

En partant de ce résultat, il est possible de prévoir que parmi 1 million de personnes exposées à 1 rad, on peut s'attendre, là encore, à 50 cancers. Mais, il s'agit d'un calcul, et nous aurions bien du mal à le confronter avec l'expérimentation car :

a) Comment trouver 1 million de personnes irradiés à 1 rad ?

b) Parmi 1 million de personnes, il faut s'attendre à observer 4000 cancers naturels comment alors interpréter les 50 cancers supplémentaires induits par l'irradiation ?

On constate bien que, dans le domaine des faibles doses, le risque est trop faible pour être mesuré. Il ne peut être que calculé.

Les figures 22 et 23 montrent la fréquence annuelle des morts avec leucémie parmi les irradiés d'Hiroshima et de Nagasaki. On notera l'incertitude importante sur la fréquence : elle correspond à un intervalle de confiance de 95%. On notera également que, dans le cas d'Hiroshima, où le rayonnement contenait des photons et des neutrons, l'extrapolation linéaire semble valable même aux faibles doses, ce qui suggère qu'il n'y a pas de phénomènes de restauration cellulaire. Dans le cas de Nagasaki, où les particules étaient toutes des

photons (faible T.L.E.), la fréquence semble très faible au dessous de 50 rad ce qui permet de supposer que la restauration cellulaire intervient.

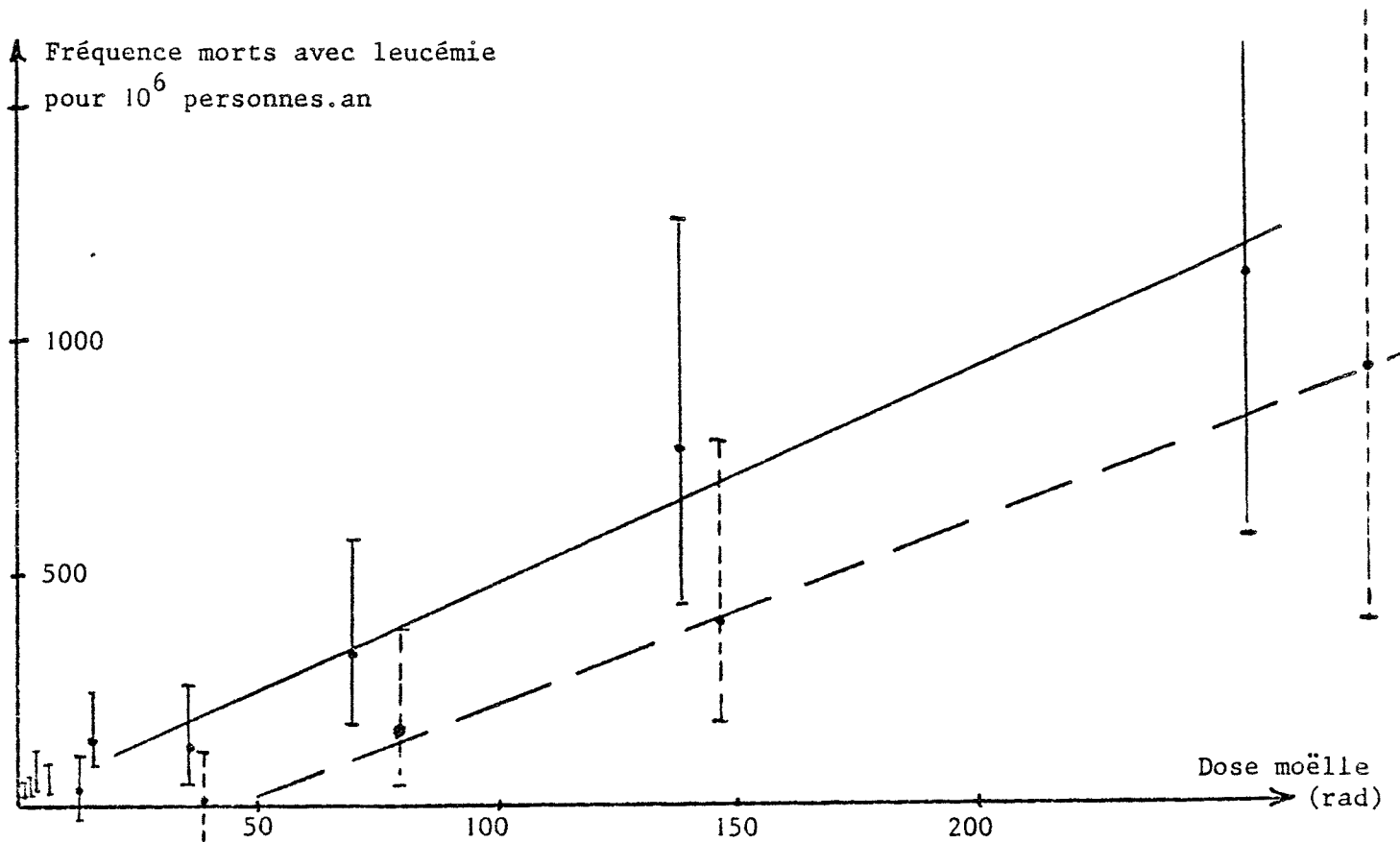


Fig.22.Fréquence annuelle moyenne de morts avec leucémie parmi les irradiés d'Hiroshima (trait continu) et de Nagasaki (pointillés). Les barres verticales représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

La figure 23 représente avec des échelles différentes, la zone des faibles doses de la figure 22. Noter que l'abscisse n'est pas la même pour les deux catégories d'irradiés. Au faibles doses, la forme des courbes montre une diminution de la fréquence par rapport à la fréquence naturelle.

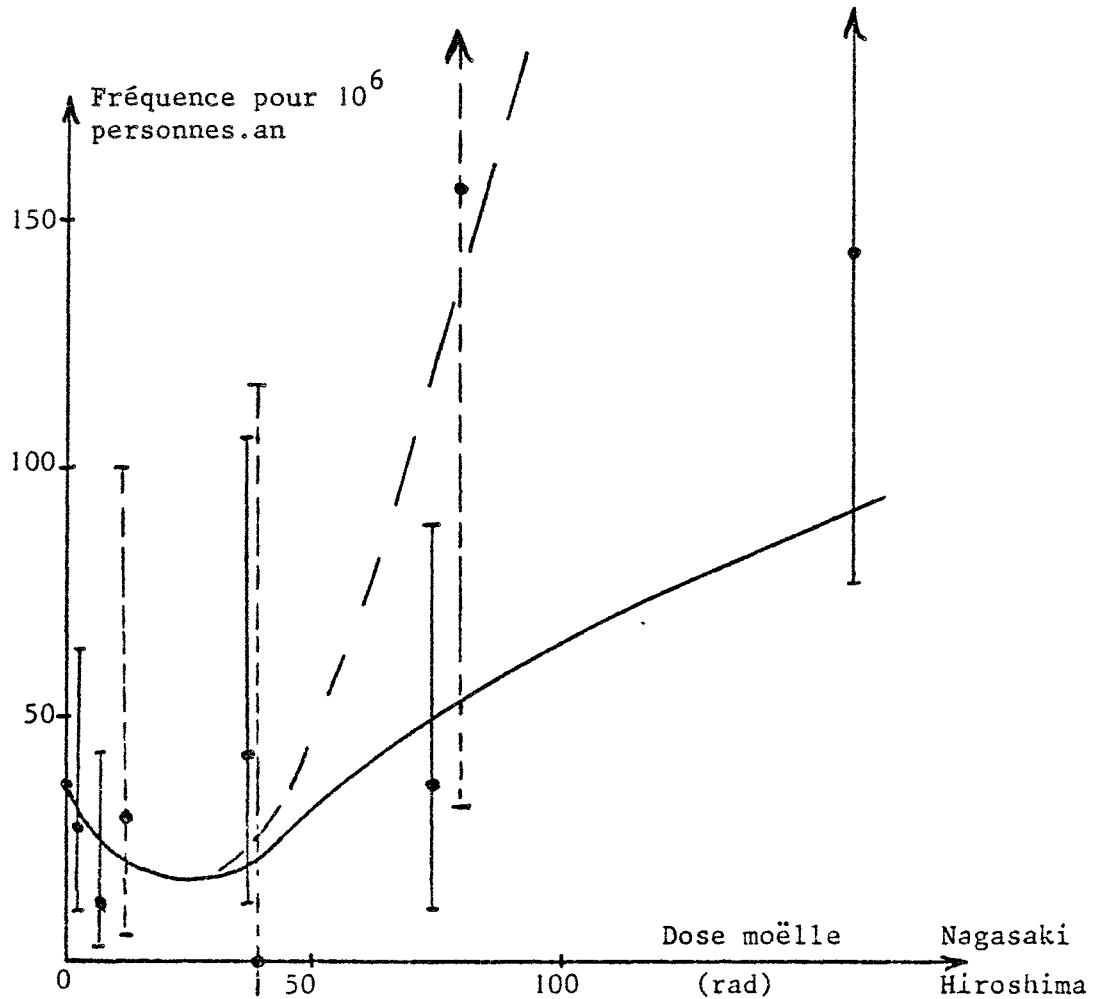


Fig.23.Représentation agrandie de la zone des faibles doses de la figure 22 ; traits continus pour Hiroshima et pointillés pour Nagasaki.

L'hypothèse de linéarité des effets aux faibles dose apparaît comme une hypothèse prudente. Aux faibles doses, le risque réel est certainement inférieur au risque estimé et, pour certaines maladies, il est peut-être nul !

La figure 24 montre une autre relation dose-effet dans laquelle on met en évidence le fait que le risque encouru dépend de l'âge auquel l'irradiation a eu lieu.

Fréquence pour
10⁶ personnes

- 14 -

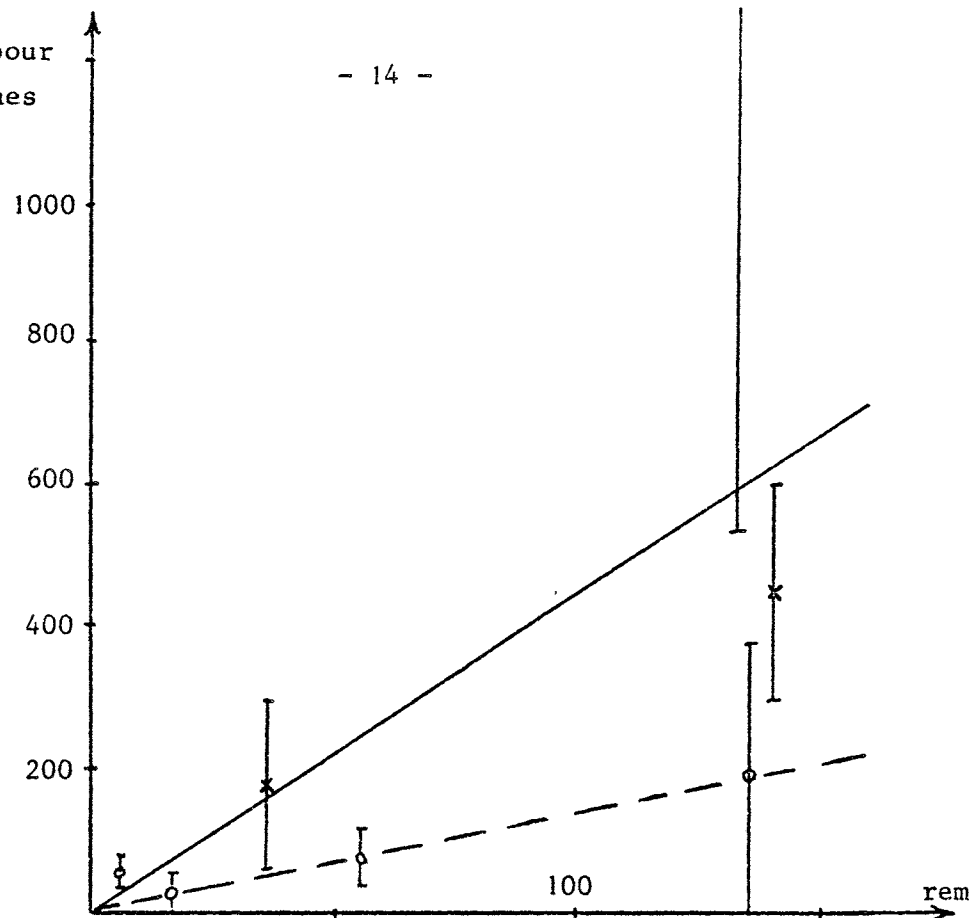


Fig.24. Estimation du risque de cancer de la thyroïde en fonction de l'équivalent de dose.

$0 < 10 \text{ ans}$
 $X > 10 \text{ ans}$
} âge de la personne, au moment de l'irradiation

3-Effets génétiques et effets tératogènes.

Les effets génétiques sont en fait des effets aléatoires. Comme dans le cas des cancers, les mesures sont rendues délicates par la non-spécificité (les malformations génétiques apparaissant spontanément) et par la faible probabilité de ces effets (il faudrait étudier une population très nombreuse).

A ces difficultés vient s'ajouter le fait que beaucoup de malformations génétiques conduisent à une élimination spontanée de l'embryon anormal.

En matière d'effet génétique, il convient d'être extrêmement prudent, les malformations pouvant se manifester plusieurs générations plus tard.

Les observations faites à Hiroshima et Nagasaki ne nous donnent certainement pas un recul suffisant, mais on peut observer en un ou deux points du globe, des groupes soumis à des doses naturelles dépassant 1000 mrad par an. Dans l'état du Kérala, en Inde, l'irradiation, qui provient du sous-sol, a existé de tous temps et n'a entraîné aucune particularité chromosomique.

Précisons bien que les malformations présentées par un enfant qui a été irradié au stade embryonnaire ne font pas partie des effets génétiques puisque les effets se manifestent sur l'irradié lui-même. Ces effets sont dits "tératogènes" et ce sont, semble-t-il, des effets à seuil. Le seuil est, d'ailleurs bas : de 1 à 10 rad pour des embryons de moins de 3 mois, et 25 rad au delà. Les effets sont : malformations, mort foetale. L'induction de cancers ou de leucémies est controversée. De toutes manières, les risques d'effets tératogènes ne concernent pas le public qui n'est jamais exposé à des doses de cet ordre. Ils concernent, par contre, les femmes qui travaillent en présence de rayonnement. Ils concernent encore plus les femmes soumises à des irradiations médicales (qui dépassent parfois 1 rad).

4-Conclusion à l'étude des effets pathologiques des rayonnements.

L'étude des effets pathologiques est, nous l'avons vu, rendue très délicate par :

- la non-spécificité des maladies induites,
- la longueur du temps de latence,
- le faible pourcentage d'individus atteints : afin d'étudier avec précision le risque de leucémie induit par de faibles doses, il faudrait observer 200 millions de personnes irradiées à 1 rad.
- l'importance des irradiations naturelles et médicales (cf. chapitre IV).

Le dernier point est particulièrement gênant. Les ordres de grandeur des irradiations naturelles sont :

- irradiations telluriques : de 10 à 400 mrem/an
- irradiations cosmiques : de 30 à 60 mrem/an
- irradiation interne : 20 mrem/an

L'irradiation tellurique provient des roches et varie d'un lieu à l'autre : le débit peut varier d'un facteur 3 sur quelques kilomètres. Comment trouver, dans ces conditions, une population de référence pour mener une étude ?

L'irradiation cosmique provient des étoiles et varie avec l'altitude.

L'irradiation interne est engendrée par les radionucléides présents naturellement dans l'organisme et varie peu d'un individu à l'autre.

Les irradiations médicales valent, en moyenne, 100 mrem par an, mais certaines personnes dépassent cette valeur de beaucoup.

Il est difficile de prévoir les effets engendrés par les doses industrielles qui sont environ 1000 fois plus faibles. On prévoit qu'en l'an 2000 l'irradiation et la contamination dues à la production d'électricité dans les centrales nucléaires conduiront à des équivalents de dose qui ne dépasseront pas 1 mrem par an et par personne.

Il convient donc de ne pas s'alarmer exagérément. L'importance que l'on donne aux effets cancérogènes des rayonnements ionisants ne doit pas non plus servir à camoufler les effets cancérogènes des produits chimiques. Ainsi, l'éthylène, présent dans l'atmosphère à proximité des raffineries de pétrole engendre des effets aléatoires, comme les photons. On estime que 0,15 ppm d'éthylène en permanence sont équivalents à une dose de 170 mrad par an. Songeons qu'à Lyon, on mesure des teneurs variant entre 0,04 et 0,40 p.p.m. (La Recherche n°103, septembre 1979, page 884). Songeons aussi que le tabac tue, en France, 37 000 personnes par an.

B I B L I O G R A P H I E

- Cours de contrôles non destructifs - CAST - INSA
- Developments en pressure vessel technology
R.W. NICHOLS
Applied science publishers LTD - LONDON 1979
- La pratique du contrôle industriel par ultrasons
J.L. PELLETIER
Editions des communications actives - 34, rue de la victoire 75009 PARIS